



Apprentissages par enseignement à partir d'environnements complexes : effets de l'isolement des éléments en interaction et du séquençement de la présentation

Dominique Bellec

► To cite this version:

Dominique Bellec. Apprentissages par enseignement à partir d'environnements complexes : effets de l'isolement des éléments en interaction et du séquençement de la présentation. Psychologie. Université Toulouse le Mirail - Toulouse II, 2015. Français. NNT : 2015TOU20013 . tel-01284008

HAL Id: tel-01284008

<https://theses.hal.science/tel-01284008>

Submitted on 7 Mar 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse – Jean Jaurès

Présentée et soutenue par :

Dominique Bellec

Le 1er juin 2015

**Apprentissages par enseignement à partir d'environnements complexes :
effets de l'isolement des éléments en interaction et
du séquençage de la présentation**

Ecole doctorale et discipline ou spécialité :

ED CLESCO : Psychologie

Unité de recherche :

Laboratoire CLLE (Cognition, Langues, Langage et Ergonomie)

Directeur de thèse :

André Tricot, Professeur des Universités, Université de Toulouse 2

Jury :

Mireille Bétrancourt, Professeure des Universités, Université de Genève (Rapporteur)

Eric Jamet, Professeur des Universités, Université de Rennes 2 (Rapporteur)

Bernard Multon, Professeur des Universités, ENS de Rennes (Examineur)

Jean François Rouet, Directeur de recherche CNRS, Université de Poitiers (Examineur)

André Tricot, Professeur des Universités, Université de Toulouse 2 (Directeur de thèse)

À mon épouse Christine et à mes enfants
Corentin, Paul et Marie-Eugénie. Ils sont tous les
quatre la source de mon bonheur au quotidien.

À mes parents et à ma sœur Sophie.

À Freddy Beaurain.

À Jean René Scotet.

Remerciements

Mes remerciements à André Tricot pour avoir accepté de m'accueillir dans son équipe et pour avoir encadré ces travaux qui m'ont conduit à soutenir cette thèse. Ses qualités humaines, son charisme et son expérience m'ont encouragé à chaque instant dans cette aventure.

Merci à Mireille Bétrancourt et à Eric Jamet pour avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse. Depuis le début de mes études en psychologie, je les croise au travers de leurs communications écrites. Je suis évidemment très impressionné mais c'est pour moi une récompense de pouvoir leur soumettre ce travail et recevoir leurs appréciations.

Merci à Bernard Multon. Son envergure scientifique et ses qualités pédagogiques m'ont marqué pour toujours lors de mon passage à l'ENS de Cachan. Ne pas être performant dans mon travail d'enseignant ne m'est pas permis par respect pour mes élèves mais aussi par respect pour lui et tout ce qu'il m'a appris. C'est avec beaucoup d'émotions que j'ai appris qu'il avait accepté de faire partie de ce jury.

Merci à Jean François Rouet. Il m'a fait faire mes premiers pas dans la recherche en psychologie expérimentale et il m'a donné l'envie d'explorer cette facette des sciences humaines grâce à ses qualités personnelles et à son exigence scientifique. Je suis fier de lui montrer que j'ai persévéré sur le chemin qu'il m'avait ouvert.

Merci à Bernard Soullignac, Proviseur du lycée Louis Armand à Poitiers. Il m'a toujours encouragé dans ce projet. Il m'a donné tous les moyens pour faciliter mes travaux expérimentaux. Toujours à son poste contre vents et marées, je suis fier d'être l'un de ses matelots.

Merci à mes beaux parents et à mes amis de tous horizons pour leur intérêt, leur écoute et leur optimisme : Guitou et Patou, Joël et Monique, Poum, Pépé, Christian, Georges, Erik, Michel le croco, Bertrand, Eric, François, Cyril, ... Samuel et Pierre envisagent déjà une mesure de la charge cognitive en Micro Bellec (μBlc) !

Sommaire

Remerciements	5
Partie I	15
Partie théorique	15
Introduction générale.....	16
Chapitre 1 :	23
Apprendre ! ?.....	23
Introduction	23
1- Qu'est ce qu'apprendre ?	25
1-1 les fondements éthologiques	25
1-2 Connaissances primaires, connaissances secondaires et apprentissages.....	25
1-3 Les limites de l'apprentissage adaptatif et le rôle de l'école.....	26
2- Les facteurs cognitifs qui permettent les apprentissages	28
2-1 L'attention.....	28
2-2 L'engagement actif	29
2-3 Le retour d'information	30
2-4 La consolidation	30
2-5 Implications dans cette thèse.....	31
3- Qu'est-ce qu'on apprend ?	31
3-1 Quelles différences entre savoir et connaissance ?	31
3-2 Qu'est-ce qu'une connaissance du point de vue de l'apprentissage ?	32
3-3 Quels sont les différents formats de connaissances ?.....	32
3-4 Le rappel, la compréhension et le transfert des connaissances	35
4- Complexité des environnements et apprentissage	36
5- Conclusion du chapitre 1	37
Chapitre 2 :	39
Les limites et les atouts du système cognitif humain dans les processus d'apprentissage de connaissances secondaires.....	39
Introduction	39
1- La mémoire au centre du système cognitif	40
1-1 Approche historique	40

1-2 Système cognitif et apprentissages.....	41
2- La mémoire de travail : modèles et limites fonctionnelles	42
2-1 Les différents modèles de la mémoire de travail.....	42
2-1-1 Le modèle de Baddeley et Hitch (1986, 2000)	42
2-1-2 Le modèle de Cowan (2001)	43
2-1-3 Le modèle de Towse et Hitch (1995).....	43
2-1-4 Le modèle de Barrouillet et Camos (2007)	44
2-1-5 La mémoire de travail à long terme (Ericsson et Kintsch, 1995).....	44
2-2 Les limites de la mémoire de travail	45
2-2-1 La quantité d'information à maintenir simultanément en mémoire de travail	46
2-2-2 Les unités d'information fortement interactives	46
2-3 Mémoire de travail et apprentissages	47
2-3-1 L'augmentation des capacités de la mémoire de travail	48
2-3-2 La psycho-ergonomie des environnements d'apprentissage	49
2-3-3 Implications dans cette thèse.....	50
3 – La mémoire à long terme	51
3-1 Les différentes structures de la mémoire à long terme.....	52
3-3 Les mécanismes d'encodage, de stockage et de récupération	55
3-4 Apprentissage en profondeur et apprentissage en surface	55
3-5 Implications dans cette thèse.....	56
4- La mémoire de travail et la mémoire à long terme : un couple performant pour les apprentissages de connaissances secondaires ?.....	57
5- Conclusion du chapitre 2	57
Chapitre 3 :	59
Apprentissage de connaissances secondaires	59
à partir de systèmes complexes	59
Introduction	59
1- Qu'est ce qu'un système complexe ?	60
1-1 Approche générale.....	60
1-2 Systèmes complexes – systèmes compliqués.....	62
1-3 La mesure de la complexité des systèmes	63
1-4 La complexité dans le champ de la psychologie cognitive	63
1-4 Implications pour l'enseignement dans les domaines techniques et scientifiques à l'école.....	65

2-1 Les prémisses de la notion de système technique	66
2-2 Approche analytique et approche systémique	67
2-3 Approche fonctionnelle, structurelle et comportementale	68
3- Les stratégies pédagogiques pour enseigner à partir de systèmes complexes...	68
3-1 La démarche générale pour le développement d'une séquence pédagogique .	69
3-2 La pédagogie déductive.....	69
3-3 La pédagogie inductive	70
3-4 Le modèle de la « boucle de base ».....	73
3-6 Implications dans le contexte de cette thèse.....	74
4- Les effets des connaissances préalables lors des apprentissages complexes	75
4- 1 Apprentissages complexes et mise en relation avec les connaissances naïves	75
4-2 Structuration des connaissances et changement conceptuel dans les domaines scientifiques et techniques	76
4-3 Quelques exemples dans les disciplines technologiques et scientifiques	77
4-3-1 Exemples dans les domaines technologiques.....	77
4-3-2 Exemples dans les domaines scientifiques.....	78
4-4 Implication dans le cadre de cette thèse	78
5- Les effets des connaissances préalables dans le cas d'une progression pédagogique.	79
6- Synthèse du chapitre 3	80
Chapitre 4	81
L'Instructional Design :	81
Une approche psycho-ergonomique de la conception des environnements d'apprentissage de connaissances secondaires.....	81
Introduction	81
1-Positionnement historique et conceptuel de <i>l'Instructional Design</i>	83
1-1 L' <i>Instructional Design</i> : une activité de conception de situations d'enseignement	83
1-2 Bref historique des théories pédagogiques.....	84
1-3 Théories pédagogiques et <i>Instructional Design</i>	86
1-3-1 Influences de l'approche béhavioriste dans <i>l'Instructional Design</i>	87
1-3-2 Influences de l'approche cognitiviste dans <i>l'Instructional Design</i>	88
1-3-3 Influences de l'approche constructiviste dans <i>l'Instructional Design</i>	88
1-3-4 Des influences des théories pédagogiques à la conception ergonomique d'environnements d'apprentissage	89
1-4 L' <i>Instructional Design</i> : une démarche rationnelle de conception d'une situation	

d'apprentissage	90
1-4-1 Un exemple de procédure de conception : le modèle ADDIE	91
1-4-2 Un exemple de modèle pour concevoir des séquences pédagogiques orientées vers un but : le modèle 4C/ID pour les apprentissages complexes	92
1-4-3 L'intégration de l'ergonomie cognitive dans la conception de séquence d'apprentissage.	93
1-4-4 Synthèse	93
2- Les courants théoriques pour la conception ergonomique en <i>Instructional Design</i> ...	94
2-1 La Théorie de la charge cognitive	94
2-2 Le courant théorique des « <i>desirable difficulties</i> »	99
2-3 Implications dans cette thèse.....	100
3- Conception de dispositif pour enseigner des connaissances complexes : le séquençage des informations	101
3-1 Les <i>Part-Task Models</i>	102
3-2 Les <i>Whole Task Models</i>	106
3-3 Implications dans le contexte de cette thèse.....	108
4- Les effets de l'isolement des éléments en interaction et du séquençage de la présentation	109
4-1 Le pré-apprentissage	109
4-2 La présentation des problèmes sous forme modulaire	110
4-3 L'utilisation de sous-buts.....	112
4-4 L'effet d'isolement des éléments fortement interactifs	113
5- Conclusion du chapitre 4	115
Partie II.....	117
Contribution empirique	117
Introduction	118
1- Objectifs et hypothèses générales	118
1-1 Objectifs de la contribution empirique.....	118
1-2 Hypothèses générales	119
2- Définition du degré de complexité des contenus à apprendre	119
3- Définition du degré d'isolement des parties du tout.....	120
4- Scénario des expérimentations présentées	121
Chapitre 5	123
Expérimentation 1. Apprentissage en deux étapes :.....	123

Effet de l'ordre de présentation dans un environnement peu complexe	123
1- Objectif et hypothèses	123
2- Contexte technique et scientifique du support	123
3- Méthode	125
3-1 Participants	125
3-2 Matériel d'apprentissage	125
3-3 Procédure expérimentale	126
3-3-1 Pré-test	127
3-3-2 Phase d'étude	127
3-3-3 Post-test	127
3-3-4 Variables indépendantes et dépendantes	128
4- Résultats	129
5- Discussion	129
Chapitre 6	131
Expérimentation 2. Apprentissage en deux étapes :	131
Effet du degré d'isolement des éléments dans un environnement complexe	131
1- Objectifs et hypothèses	131
2- Contexte technique et scientifique du support	131
3- Méthode	132
3-1 Participants	132
3-2 Matériel d'apprentissage	133
3-3 Procédure expérimentale	135
3-3-1 Pré-test	135
3-3-2 Phase d'étude	137
3-3-3 Post-test	137
3-3-4 Variables indépendantes et dépendantes	137
4- Résultats	138
5- Discussion	139
Chapitre 7	141
Expérimentation 3. Apprentissage en deux étapes :	141
Effet du degré d'isolement dans un environnement très complexe	141
1- Objectifs et hypothèses	141
2- Contexte technique et scientifique du support	141
3- Méthode	142

3-1 Participants	142
3-2 Matériel d'apprentissage	143
3-3 Procédure expérimentale	145
3-3-1 Pré-test.....	145
3-3-2 Phase d'étude	147
3-3-3 Post-test	147
3-3-4 Variables indépendantes et dépendantes	147
4- Résultats	148
5- Discussion	149
Chapitre 8	151
Expérimentation 4	151
1- Objectifs et hypothèses	151
2- Contexte technique et scientifique	151
3- Méthode	151
3-1 Participants	151
3-2 Matériel d'apprentissage	152
3-3 Procédure expérimentale	152
3-3-1 Pré-test.....	152
3-3-2 Phase d'étude	153
3-3-3 Post-test	153
3-3-4 Variables indépendantes et dépendantes	153
4- Résultats	154
5- Discussion	156
Synthèse de la contribution empirique	159
Partie III.....	163
Conclusion générale	163
Références bibliographiques	169
Annexe 1 :	195
Expérimentation 1	195
Prétest et post test.....	195
Exemples de planche d'étude	195
Annexe 2 :	207
Expérimentation 2	207
Prétest et post test.....	207

Exemples de planches d'étude	207
Annexe 3 :	223
Annexe 4 :	249
Expérimentation 4	249
Post test	249
Annexe 5 : Petit guide de présentation de la démarche expérimentale en psychologie à l'intention des enseignants de l'Education nationale	271
Introduction	272
1- La démarche générale	272
2- La mise en place d'une expérimentation	272
2-1 Le choix des participants.....	273
2-2 Le matériel expérimental.....	273
2-3 La procédure expérimentale	273
3- Le recueil des résultats et leur traitement	273
3-1 Le traitement statistique sur les échantillons (les statistiques descriptives)..	274
3-2 Les traitements statistiques pour généraliser les résultats (les statistiques inférentielles).....	274
4- Conclusion	274

Partie I

Partie théorique

Introduction générale

Cette thèse porte sur la conception d'environnements pour des apprentissages directs et explicites pratiqués dans les établissements scolaires, à l'Université ou encore dans les centres de formation professionnelle. Plus particulièrement, cette thèse se situe dans le domaine de l'*Instructional Design*, un champ de recherche anglo-saxon qui génère des connaissances pour améliorer la conception de l'enseignement, et plus particulièrement les supports et les tâches au sein de ces dispositifs.

Alors que les apprentissages adaptatifs relèvent de l'adaptation à l'environnement et ne demandent aucun effort, les apprentissages non adaptatifs demandent des efforts et de la motivation. La psychologie des apprentissages reconnaît trois catégories de facteurs (fig. 1) caractérisant les apprenants (NKambou, Delozanne & Frasson, 2007) : les facteurs cognitifs, conatifs et affectifs. Les facteurs cognitifs concernent les connaissances et les habiletés nécessaires à la prise de décisions et à la résolution de problèmes. Les facteurs conatifs concernent, en partie, les buts et la motivation à les atteindre. Les facteurs affectifs concernent le style ou la personnalité des apprenants, et leur impact sur les émotions. Le potentiel d'un individu est fonction de ces trois facteurs qui, en réalité, sont étroitement combinés.

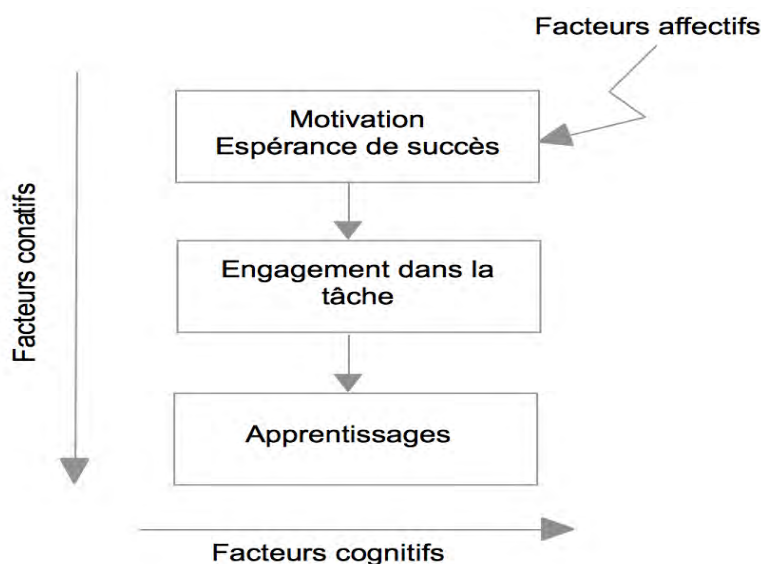


Figure 1 : Trois catégories de facteurs qui caractérisent les apprentissages d'après NKambou, Delozanne et Frasson (2007)

Dans ce sens et de façon plus détaillée, Schneider et Stern (2010) présentent dix constats clés de la recherche en psychologie cognitive qui ont des implications directes sur les

performances d'apprentissages et sur la manière de construire les environnements d'apprentissage :

- l'apprentissage est une activité exercée par l'apprenant. Il est le seul acteur de la construction de ses connaissances et les environnements d'apprentissage créés par les enseignants restent simplement des moyens pour les engager dans les processus d'apprentissage ;
- l'apprentissage optimal tient compte des acquis. Pour traiter de nouvelles informations, notre cerveau cherche à les mettre en lien avec des connaissances déjà acquises. Que ce soit dans des domaines spécifiques (Stern, 2001) ou bien dans des domaines généraux (Grabner, Stern & Neubauer, 2007 ; Vosniadou & Verschaffel, 2004), l'apprentissage est fortement tributaire des connaissances antérieures. Vosniadou (2008) l'a montré dans des différentes disciplines comme la physique, l'astronomie, la médecine et l'histoire ;
- l'apprentissage requiert l'intégration des structures de connaissances car il repose sur l'établissement de liens entre de nouvelles informations et les connaissances antérieures de l'apprenant. L'apprentissage est essentiellement un processus cumulatif, c'est-à-dire que les nouvelles connaissances s'associent aux connaissances antérieures soit pour les confirmer, soit pour y ajouter de nouvelles informations, soit pour les nier (Tardif, 1992) ;
- l'apprentissage optimal est l'acquisition équilibrée de concepts, d'habiletés et d'une compétence métacognitive ;
- l'apprentissage optimal développe des structures complexes de connaissances en hiérarchisant les éléments de savoirs ;
- l'apprentissage peut s'appuyer sur les structures du monde extérieur aux fins de structuration mentale des connaissances. Lorsque les apprentissages se situent dans des contextes issus du monde réel, le rappel, la résolution de problèmes sont liés à des situations semblables à celles qui seront probablement utilisées ultérieurement, facilitant ainsi leur transfert. Il est donc important de présenter aux élèves des tâches culturellement significatives et motivantes qui font un usage délibéré du contexte physique et social des apprenants (Vosniadou, Ioannides, Dimitrakopoulou & Papademetriou, 2001)

- l'apprentissage est tributaire des capacités limitées du système humain de traitement de l'information ;
- l'apprentissage résulte de l'interaction dynamique des émotions, de la motivation et de la cognition ;
- l'apprentissage optimal élabore des structures de connaissances transférables ;
- l'apprentissage demande du temps et des efforts.

Pour être efficace, un environnement d'apprentissage doit donc être motivant, tenir compte des acquis et être compatible avec les possibilités de traitement du système cognitif des apprenants.

Dans cette thèse, les aspects conatifs et affectifs ne seront pas abordés. Seuls les aspects cognitifs feront l'objet de l'étude et en particulier dans le cas où les situations d'apprentissage sont construites avec des supports scientifiques et technologiques en lien avec la réalité de la vie personnelle ou professionnelle des apprenants. Ces supports sont par nature complexes car ils résultent de l'interaction entre de nombreux éléments (matériels, informations) et des relations plus ou moins visibles et pas toujours simples.

Le traitement cognitif d'un support d'apprentissage, que ce soit au travers des notes de cours, des manuels scolaires, des diapositives, des documents remis aux élèves, des logiciels d'apprentissage sur ordinateur, des systèmes techniques en formation technologique ou professionnelle, nécessite de traiter de nombreuses informations en mémoire de travail. Ainsi, la performance d'apprentissage dépendra à la fois de la quantité de ressources nécessaires pour traiter les informations inhérentes au savoir objet de l'apprentissage mais aussi de la quantité de ressources disponibles en mémoire de travail.

Pour faciliter les apprentissages et donc favoriser l'élaboration de connaissances, les recherches dans le domaine de l'*Instructional Design* préconisent des approches en plusieurs étapes pour diminuer temporairement la complexité et faciliter le traitement des informations par la mémoire de travail (van Merriënboer & Kirschner, 2007). Plus précisément, dans cette thèse, nous allons examiner une approche qui consiste à décomposer la complexité (que nous appellerons « le tout ») en éléments plus simples (que nous appellerons « les parties ») puis à concevoir un séquençement d'apprentissage en deux étapes, fondé sur la présentation de ces deux ensembles d'informations.

Les résultats empiriques montrent qu'un séquençement, qui progresse des parties vers

le tout, améliore sensiblement les performances d'apprentissage. van Merriënboer, Kester et Paas (2006) soutiennent que ce sens de progression peut conduire à un paradoxe : ces approches conduisent souvent à une amélioration des performances en rappel mais diminuent les performances en situation de transfert. Ces chercheurs préconisent l'approche inverse. En s'appuyant sur le modèle 4C/ID (*Four Components / Instructional Design*) de van Merriënboer pour les apprentissages complexes (voir van Merriënboer & Kirschner, 2007), ces auteurs ont fait valoir que de nombreuses tâches ne sont pas toujours liées par des relations de cause à effet, et peuvent nécessiter l'intégration d'un certain nombre de connaissances au préalable. Dans ces conditions, une progression du tout vers les parties est recommandée car les apprenants ont besoin de savoir comment les différents éléments interagissent les uns avec les autres. En revanche, en adoptant une approche des parties vers le tout, de telles interactions peuvent être comprises plus facilement. van Merriënboer, Kester et Paas (2006) soutiennent une approche du tout vers les parties, mais n'ont pas vérifié leur hypothèse empiriquement. Peu de recherches ont comparé un séquençement du tout vers les parties avec un séquençement des parties vers le tout. Une exception notable est celle de Mayer, Mathias et Wetzell (2002), qui montre qu'un séquençement des parties vers le tout devrait être plus efficace qu'un séquençement du tout vers les parties. Cette prédiction est également soutenue par la théorie de la charge cognitive qui soutient que dans le cas de « l'effet des éléments interactifs présentés isolément » (*the isolated interacting element effect* en anglais), l'apprentissage est plus performant en isolant les éléments avant de présenter le système complexe (Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011). L'hypothèse théorique cruciale de « l'effet des éléments interactifs présentés isolément » est que le nombre et la complexité des interactions sont momentanément réduits.

La théorie de charge cognitive, fondée sur une vision capacitaire de la mémoire de travail, est focalisée sur la gestion des ressources cognitives durant le traitement des informations constitutives de l'environnement d'apprentissage. En ce sens, elle s'intéresse à l'identification de la part des ressources mobilisées par l'apprenant qui sont utiles à l'apprentissage de celle qui ne sont pas utiles. La théorie de la charge cognitive a un domaine de validité dans une temporalité très restreinte : au moment même où les apprenants traitent l'information. Cette dimension ergonomique doit être associée à une dimension d'engagement car les apprentissages non adaptatifs sont conditionnés par un engagement actif et nécessitent de la motivation (Figure 2).

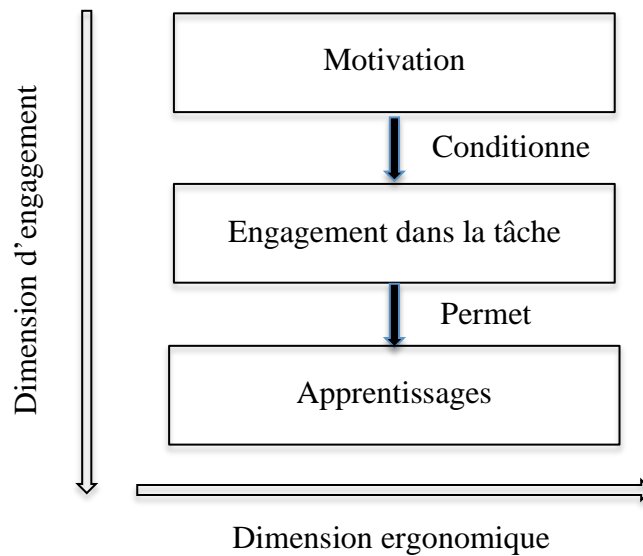


Figure 2 : Les dimensions ergonomique et d'engagement pour les apprentissages non adaptatifs

La dimension d'engagement pose alors la question du sens de progression du tout vers les parties et des parties vers le tout. En effet, la présentation du tout est certes exigeante pour la mémoire de travail dans le traitement immédiat d'un environnement riche en informations mais peut faire appel aux connaissances sur le monde des apprenants. La progression du tout vers les parties peut donc donner plus de sens à la situation d'apprentissage et en même temps soulager la mémoire de travail. D'autre part, la présentation du tout impose un traitement plus actif, plus en profondeur, conduisant ainsi à une meilleure mémorisation des informations.

Jusqu'à présent, les travaux décrits dans les recherches sur l'effet des éléments interactifs présentés isolément :

- n'ont pas testé le séquençement qui va du tout vers les parties ;
- n'ont pas comparé les performances d'apprentissage en manipulant le niveau de complexité du contenu à apprendre ;
- n'ont pas testé l'effet du degré d'isolement des parties vis à vis du tout ;
- n'ont pas examiné les performances d'apprentissage en fonction de la nature de l'utilisation future des connaissances apprises : le rappel, la compréhension et le transfert.

Pour compléter les travaux menés dans ce domaine de recherche, nous présentons dans cette thèse un ensemble de quatre expérimentations dont l'objectif est d'étudier l'effet de l'ordre de

présentation des parties et du tout puis de l'isolement des parties d'un tout sur les performances d'apprentissage en manipulant :

- le niveau de complexité du matériel (peu complexe à très complexe) ;
- le degré d'isolement des parties vis à vis du tout (totalement isolé, partiellement isolé).

Pour donner une dimension applicative à ce travail de recherche, les expérimentations ont été menées dans des classes de lycées et d'Instituts Universitaires de Technologie (IUT) et fondées sur les objectifs des programmes et des référentiels du ministère de l'Education Nationale. Les supports techniques et scientifiques des contenus d'apprentissage ont été réalisés à partir de systèmes techniques complexes étudiés dans les laboratoires d'enseignement technologique. Les environnements d'apprentissage ont été développés sur un support informatique multimédia à partir de descriptions sous forme de textes et de graphiques, de relations mathématiques et de données contextuelles.

Nous consacrerons les quatre premiers chapitres de cette thèse à une revue de la littérature sur les apprentissages à partir de systèmes complexes et sur la conception d'environnement d'apprentissage fondés sur l'*Instructional Design*. Les quatre chapitres suivants seront consacrés à la présentation de quatre expériences qui permettent de tester l'effet de l'ordre de présentation et du degré d'isolement des éléments constitutifs de la complexité d'un système technique sur les performances d'apprentissage. Enfin, une conclusion permettra d'ouvrir la réflexion sur des recherches futures.

Chapitre 1 :

Apprendre ! ?

Introduction

Cette thèse portant sur les apprentissages scolaires, nous allons décrire comment les humains apprennent en dehors de l'école, cet apprentissage présentant de nombreux points communs avec les apprentissages des autres animaux, notamment sociaux, pour ensuite mieux caractériser la façon dont les élèves apprennent à l'école. Selon Tricot (2003, p. 411), « les systèmes biologiques ont appris quelque chose quand ils sont capables de réutiliser une trace d'un environnement dans le même environnement ou un autre, ultérieurement. Ces traces sont un événement, une différence, un signe, etc. ».

Les apprentissages ne se font pas tous de façon naturelle et certaines connaissances peuvent être nécessaires pour s'intégrer dans son environnement social, culturel, physique. Pour apprendre des connaissances qui ne s'acquièrent pas de façon naturelle, les humains mettent en place des situations artificielles d'apprentissage. Dans la plupart des pays du monde, des écoles assurent ces apprentissages en confiant à des enseignants la conception et l'animation de séquences d'enseignement. Ces apprentissages à partir de situations artificielles n'ont *a priori* aucune raison d'échapper aux mécanismes des apprentissages naturels, ce sont seulement les situations qui sont artificielles. Ces apprentissages nécessitent des efforts importants (cognitifs, motivationnels) et peuvent difficilement être mis en œuvre lors de simples situations d'exploration, de découverte ou d'adaptation. Ils nécessitent donc un enseignement par un tiers (un enseignant ou bien un environnement informatisé) et un guidage pédagogique.

De nombreux travaux empiriques visent à mettre à jour des façons de réduire le coût cognitif des situations d'apprentissage par enseignement tout en maintenant le but

d'apprentissage.

Dans un premier temps, nous présenterons ce qu'est l'apprentissage au sens le plus général c'est-à-dire d'un point de vue éthologique et nous évoquerons la différence entre les connaissances primaires (qui résultent d'une caractéristique propre aux êtres vivants pour s'adapter à leur environnement immédiat et nécessaire à la survie de l'espèce) et les connaissances secondaires qui doivent être enseignées pour être apprises. Dans nos sociétés modernes, nous montrerons que l'école joue un rôle prépondérant dans l'apprentissage de ces connaissances secondaires avec des enseignants qui conçoivent et mettent en œuvre les séquences pédagogiques, utilisant notamment des environnements d'apprentissage composés de supports (livres, systèmes techniques, ordinateurs, ...). Enfin, dans l'échelle de l'évolution, le cerveau humain n'ayant pas encore acquis la maturité suffisante pour apprendre les connaissances secondaires sans effort et sans motivation, nous montrerons que les enseignants doivent construire des environnements d'apprentissage adaptés aux possibilités de traitement du système cognitif vis à vis de la complexité du matériel à apprendre.

Dans un deuxième temps, nous aborderons les apprentissages sous l'angle des sciences cognitives en présentant les facteurs cognitifs qui permettent les apprentissages. Nous insisterons sur les limites du système attentionnel en situation d'apprentissage pour introduire la théorie de la charge cognitive qui propose un cadre théorique et de nombreuses applications validées empiriquement pour construire des environnements d'apprentissage compatibles avec les atouts et les limites du système cognitif humain.

Dans un troisième temps, nous présenterons les différents formats de connaissances secondaires et la manière dont elles sont mobilisables à l'école. Cette partie permettra d'introduire les notions de rappel, de compréhension et de transfert des connaissances.

Enfin, dans la perspective des travaux présentés dans cette thèse qui cherchent à évaluer les performances d'apprentissage à partir d'environnements complexes à l'aide de séquencements en deux étapes fondés sur la présentation du « tout » et de ses « parties », nous examinerons pourquoi il peut être judicieux de se confronter à l'étude de la complexité (du « tout ») dans la première étape, cette stratégie n'étant pas en accord avec la théorie de la charge cognitive.

1- Qu'est ce qu'apprendre ?

1-1 les fondements éthologiques

Immelmann (1982, p. 30) définit l'apprentissage comme une notion qui englobe « tous les processus qui entraînent chez l'individu une adaptation du comportement aux conditions données du milieu, c'est-à-dire qui provoquent des modifications comportementales à la suite d'expériences individuelles ». Stagl (1995) souligne que la survie de l'homme est dépendante de sa capacité à s'adapter à de nouvelles situations et que la curiosité en est une composante essentielle. Pour Stagl (1995, p. 2), « les éthologistes et les psychologues semblent en accord sur le fait que la curiosité implique les activités motrices, qu'elle est mobilisée par les nouvelles situations ou les situations inconnues, qu'elle n'a pas forcément un but immédiat, qu'elle est liée aux activités de jeu et qu'elle conduit, à long terme, à des apprentissages ».

Dans le domaine du langage, Tomassello (2003, p. 88), indique que l'apprentissage est en partie fondé sur la sensibilité aux régularités de l'environnement. Tenenbaum, Griffiths et Kemp (2006) suggèrent que l'apprentissage est basé sur des inférences statistiques et plus particulièrement avec un modèle de type Bayésien ; c'est à partir d'observations (quelquefois peu nombreuses) que nous émettons une hypothèse la plus plausible. Selon ces mêmes auteurs, « la cognition humaine repose sur un talent unique pour extraire des connaissances généralisables à partir de quelques exemples précis (...) ». Nous retrouvons ce type d'apprentissage dans les systèmes physiques en commande adaptative par modèle interne (Bachir, Trigeassou & Poinot, 2003). La capacité à généraliser à partir de données clairsemées est cruciale non seulement dans l'apprentissage de la signification des mots, mais dans l'apprentissage des propriétés des objets, les relations de cause à effet, les règles sociales, et de nombreux autres domaines de la connaissance». Ce repérage conduit à créer des catégorisations qui permettent aux enfants d'apprendre à parler une langue.

1-2 Connaissances primaires, connaissances secondaires et apprentissages

Tulving (1983) définit une connaissance comme tout élément de notre mémoire permettant de comprendre le monde et d'agir sur lui, et qui ne nécessite pas de se souvenir de sa propre source. Un apprentissage correspond alors à l'élaboration ou à la transformation de connaissances. Dans une approche évolutionniste, Geary (2008) et Sweller (2007) proposent de distinguer les connaissances primaires des connaissances secondaires. Les connaissances

primaires seraient présentes dans l'espèce humaine depuis les débuts d'*homo sapiens*, il y a 200 000 ans. Ce sont des connaissances acquises qui constituent un héritage biologique, le fruit de notre évolution. Elles correspondent à des acquis qui permettent de réaliser avec succès des activités très complexes comme rechercher de la nourriture, communiquer avec d'autres humains, reconnaître les visages ou encore interagir physiquement avec l'environnement. Leur apprentissage fonctionne par maturation (imprégnation-adaptation). Les connaissances primaires sont apprises sans enseignement ou entraînement spécifique. Les connaissances secondaires seraient apparues chez l'humain plus récemment, depuis moins de 10 000 ans et correspondent à des connaissances que nous pouvons assimiler malgré la récence de leur apparition (lire, écrire, résoudre des problèmes de mathématiques ou encore modéliser des systèmes physiques ou vivants) mais elles doivent être enseignées pour être apprises. Pour l'acquisition de ce type de connaissances, il est nécessaire d'avoir de la motivation et de fournir des efforts. L'apprentissage des connaissances secondaires peut se faire soit par essais et erreurs (par exemple, dans le cas de l'apprentissage du dessin, il est possible d'apprendre seul par des essais successifs et ne garder que ce qui produit un résultat positif) soit par un guidage à l'aide d'un enseignement direct et explicite (par exemple, apprendre le dessin avec un professeur qui va donner des méthodes, des conseils, valider les progressions). Pour Geary (2008) et Sweller (2007) les connaissances primaires sont apprises de façon implicite alors que les connaissances secondaires sont apprises de façon explicite. Chanquoy, Tricot et Sweller (2007) préfèrent utiliser le terme d'apprentissage par instruction à la place d'apprentissage explicite car il existe des apprentissages explicites qui ne relèvent pas de l'instruction (par exemple l'imitation). Notons qu'il n'y a pas de relation directe entre connaissances primaires et apprentissages implicites d'une part et entre connaissances secondaires et apprentissages explicites d'autre part. En effet, certains automatismes peuvent être considérés comme des connaissances primaires bien qu'ils aient été acquis de façon explicite. Par ailleurs, certaines connaissances secondaires sont issues de processus d'adaptation. Ce cas de figure se retrouve dans le domaine des apprentissages professionnels (Tricot, 2012), dans l'apprentissage des Arts Martiaux, ainsi que dans les pratiques culturelles à l'adolescence (Tricot & Boubée 2007).

1-3 Les limites de l'apprentissage adaptatif et le rôle de l'école

Les apprentissages adaptatifs peuvent se faire de façon passive comme dans la reconnaissance de l'accent de mots chez les enfants (Curtin, Mintz & Christiansen, 2005) ou bien dans la reconnaissance des préfixes des mots (Gombert, 2002). Les apprentissages adaptatifs peuvent

aussi se faire de façon active au travers d'activités d'exploration de l'environnement. Une des principales caractéristiques de ces apprentissages est qu'ils ne demandent pas d'effort coûteux, pas de motivation et qu'ils ne nécessitent pas d'enseignement. En revanche, ils ne permettent d'apprendre que ce qui est adaptatif, c'est-à-dire ce qui est fréquemment présent dans l'environnement, ce qui permet d'agir et de comprendre dans ses activités quotidiennes. Par exemple, ils ne permettent pas d'apprendre à résoudre des problèmes de mécanique par des méthodes graphiques et, pour cela, un enseignement direct et explicite par un professeur de mécanique est incontournable.

L'école existe parce que certains apprentissages ne fonctionnent pas de façon naturelle, adaptative. Tricot (2011) souligne que les apprentissages réalisés à l'école sont ceux qui sont jugés utiles par la société pour ses futurs adultes. Pour cela, chaque pays a son Ministère de l'éducation (ou son équivalent) qui définit des programmes ou des référentiels de formation. Le problème est que ces apprentissages scolaires sont inutiles (au sens adaptatif) pour les élèves au moment où ils apprennent. De ce point de vue, apprendre à l'école demande du temps, des efforts et de la motivation.

D'après Ginestier et Tricot (2013), l'école organise et structure les rapports entre l'enseignement dispensé par l'enseignant et les apprentissages construits par les élèves. Du côté de l'enseignant, (MEN, 2013) expose les compétences communes à tous les professeurs et personnels d'éducation. Pour le volet relatif à la connaissance des élèves et des processus d'apprentissage, nous avons « Connaître les concepts fondamentaux de la psychologie de l'enfant, de l'adolescent et du jeune adulte. Connaître les processus et les mécanismes d'apprentissage, en prenant en compte les apports de la recherche. Tenir compte des dimensions cognitive, affective et relationnelle de l'enseignement et de l'action éducative ». De leur côté, en principe, les élèves s'engagent dans les tâches qui leur sont proposées par les enseignants pour construire leurs apprentissages. En principe, car le degré d'engagement des élèves est modulé par des facteurs cognitifs, conatifs et affectifs et de ce point de vue, aucun élève n'est semblable à l'autre. Florin et Vrignaud (2007) soulignent que seules, les dimensions cognitives ne suffisent pas à expliquer les résultats des élèves et que l'on doit considérer leurs interactions avec les dimensions conatives et affectives des apprentissages, comme la motivation, l'estime de soi et l'espérance de succès dans la réussite des élèves. Bandura (2003) insiste sur l'espérance de succès qui peut se dégrader très tôt chez les enfants et que certains cherchent à préserver leur estime de soi en n'apprenant plus ou développent très tôt un sentiment d'incompétence ou de « découragement appris » (Deci & Ryan, 2002). Selon Dweck et Molden (2005), le sentiment de compétence agit sur les émotions, la

motivation, la pensée et le comportement par le biais des « anticipations de réussite ou d'échec ». Il est alors nécessaire de considérer les élèves, les futurs adultes, comme les acteurs principaux de leur développement et de les aider à développer leurs compétences cognitives et conatives, tout en favorisant leur bien-être par leur immersion dans des environnements d'apprentissage valorisants et un encadrement bienveillant qui n'exclut pas l'exigence.

En résumé, concevoir des environnements d'apprentissage avec des contraintes psycho-ergonomiques qui optimisent les efforts fournis par les apprenants pourrait contribuer à ce que tous les élèves puissent réussir leurs apprentissages. En particulier, pour les élèves en difficulté, leur donner les moyens de rentrer dans une boucle vertueuse en améliorant leur sentiment de compétence, bon prédicteur de l'engagement dans la tâche.

Cette thèse, consacrée à l'étude de l'amélioration des conditions d'apprentissage dans une dimension psycho-ergonomique incluant uniquement les aspects liés au traitement des informations, ne développe explicitement pas les aspects conatifs et motivationnels. Ces derniers, conditionnent l'engagement dans la tâche d'apprentissage, ils sont évidemment très importants mais ne seront pas traités ici.

2- Les facteurs cognitifs qui permettent les apprentissages

Selon Dehaene (2013), les sciences cognitives ont identifié quatre facteurs déterminants pour les apprentissages : l'attention, l'engagement actif de l'apprenant, le retour d'information et la consolidation. Ces quatre facteurs sont fondés sur les caractéristiques de fonctionnement du système cognitif et profondément ancrés dès le plus jeune âge.

2-1 L'attention

L'attention est un mécanisme de filtrage qui nous permet de sélectionner une information dans la mémoire à long terme ou bien dans l'environnement et d'en moduler le traitement. Un environnement d'apprentissage performant devra bien orienter l'attention des apprenants sur les éléments pertinents pour l'apprentissage et au bon niveau pour permettre les traitements adéquats nécessaires à la construction des représentations. Le système de l'attention se décompose en trois systèmes attentionnels : l'alerte, l'orientation et le contrôle exécutif. Pour ce qui concerne les apprentissages, les limitations du système attentionnel, qui, par exemple, ne permettent pas de travailler en double tâche sont à prendre en considération lors du développement d'une séquence pédagogique. La structure et la présentation de l'environnement d'apprentissage vont donc avoir un impact important sur les performances d'acquisition de connaissances chez les apprenants. Pour améliorer ces performances, les

concepteurs de situations d'apprentissage doivent tenir compte des atouts et des limites du système cognitif humain identifiés par les très nombreux travaux de recherche en psychologie cognitive. Dans cette thèse, nous retiendrons la théorie de la charge cognitive élaborée par Sweller depuis les années 1980 qui permet d'apporter aux concepteurs de situations d'enseignement des recommandations pour construire le matériel d'apprentissage.

2-2 L'engagement actif

Comme le soulignent Schneider et Stern (2010), l'apprentissage est une activité exercée par l'apprenant. Pour apprendre des connaissances secondaires, ce dernier reçoit un enseignement qui lui demande un engagement significatif dans la tâche qui lui est assignée. Dans cette perspective, Chi et Wylie (2014) présentent le cadre théorique ICAP (*Interactive, Constructive, Active, Passive*) qui est fondé sur une catégorisation des modalités d'engagement des apprenants dans la tâche d'apprentissage. A titre d'illustration, nous donnons en figure 3 des exemples d'activités à intégrer dans la construction d'un environnement d'apprentissage pour favoriser les quatre niveaux d'engagement décrits dans le cadre théorique ICAP. Cet exemple s'appuie sur une séquence d'apprentissage à partir d'un document vidéo.

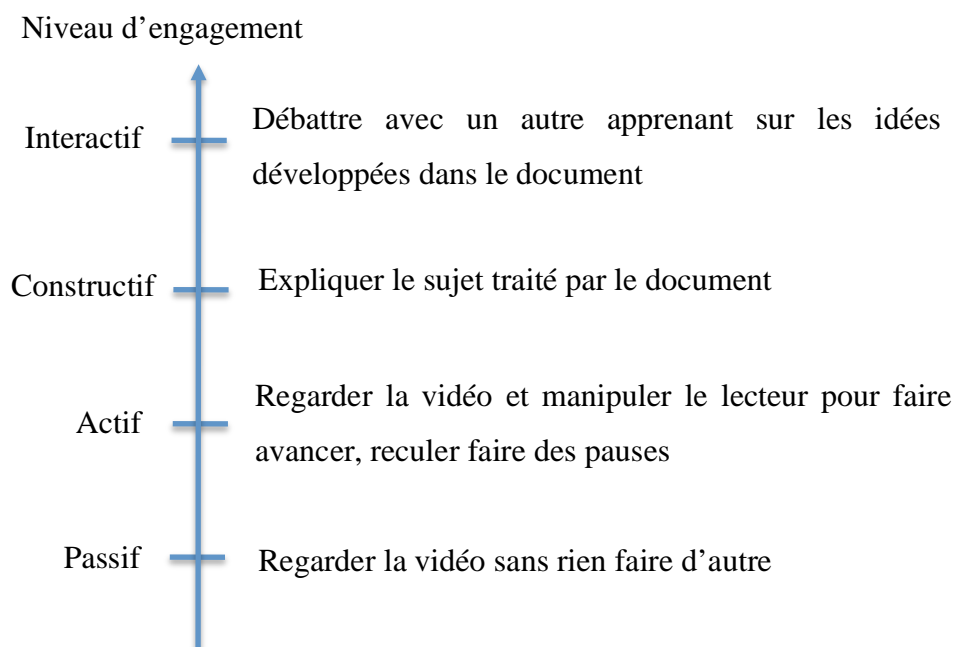


Figure 3 : Exemples de tâches pour favoriser les différents niveaux d'engagement proposés par le modèle ICAP (Chi et Wylie, 2014)

Ces auteurs soutiennent que pour l'engagement « passif » l'apprentissage reste en

surface. Pour un engagement de type « actif », l'apprentissage est peu profond alors qu'avec un mode d'engagement « constructif » et de manière plus importante avec le mode « interactif », l'apprentissage devient beaucoup plus profond avec des possibilités de transférer les connaissances apprises et d'élaborer des idées nouvelles.

Dans la même idée de générer de la profondeur de traitement lors de l'apprentissage, pour Zaromb, Karpicke et Roediger (2010), rendre les conditions d'apprentissage plus difficiles obligerait les apprenants à un surcroît d'engagement avec un effort cognitif accru qui aboutiraient paradoxalement à une attention plus soutenue. Cette stratégie est préconisée par le courant des *Desirable difficulties* de Bjork et Bjork (2011). L'engagement actif des apprenants peut être renforcé par une stratégie de régulation métacognitive en alternant les apprentissages avec des tests répétés de leurs connaissances (Karpicke & Roediger, 2008).

2-3 Le retour d'information

Les recherches en sciences cognitives (ex : Rao & Ballard, 1999) suggèrent que le cortex cérébral de notre cerveau utilise des modèles internes fondés sur des connaissances acquises pour générer des prédictions sur le monde extérieur. Il reçoit en retour des informations sensorielles qui permettent d'établir une comparaison entre le modèle interne et l'observation. La différence entre les deux génère une erreur qui va permettre d'ajuster le modèle présent et ainsi améliorer la prédiction suivante. Les erreurs entre le modèle interne et les observations sont normales et mêmes souhaitables puisqu'elles sont des conditions nécessaires aux apprentissages : pas d'erreurs, pas d'évolution du modèle interne et donc pas d'apprentissage. Dans un environnement d'apprentissage, la détection de l'erreur peut venir d'une correction explicite par un enseignant, du matériel d'apprentissage (auto-correctif comme ceux utilisés dans certaines activités de la pédagogie Montessori) ou de la détection endogène d'un décalage entre prédiction et observation.

2-4 La consolidation

L'apprentissage de connaissances secondaires résulte de traitements conscients, contrôlés, qui nécessitent des efforts, de la motivation et qui sont soumis aux limitations fonctionnelles de la mémoire de travail. Pour libérer des ressources en mémoire de travail, il est nécessaire de transférer les connaissances apprises vers des réseaux non conscients en automatisant progressivement les procédures de traitement. Cette situation s'illustre très bien avec l'apprentissage de la lecture où dans un premier temps les élèves retiennent les correspondances graphème - phonème sous forme de règles explicites, qu'ils appliquent une

par une lorsqu'ils lisent un mot. Puis, au cours des lectures, le décodage devient de plus en plus routinier et fondé sur des connaissances implicites, rapides et non conscientes.

2-5 Implications dans cette thèse

Dans le cadre de cette thèse, nous retiendrons ici l'effet de l'attention qui intervient à deux niveaux. Si l'environnement d'apprentissage ne retient pas l'attention des apprenants (par exemple dans le cas d'un environnement pauvre en informations nouvelles, peu surprenant, qui ne suscite pas d'intérêt), l'apprenant pourra ne pas traiter l'information ou ne pas la traiter au bon niveau. Un engagement actif, faire face à une certaine exigence, constitue donc une condition nécessaire à l'apprentissage. Mais, si le traitement de la situation pour apprendre demande beaucoup d'attention, les limites du système attentionnel pourront être atteintes et ne pas permettre l'apprentissage. Le développement de séquences d'apprentissage par enseignement à partir d'environnements complexes doit donc conduire à présenter aux apprenants des environnements suffisamment complexes pour retenir leur attention mais pas trop sinon ils ne pourront pas le traiter. Une stratégie possible consiste à concevoir des situations d'apprentissage fondées sur un séquençement en deux étapes afin de gérer temporairement le niveau d'information présenté aux apprenants durant l'apprentissage.

3- Qu'est-ce qu'on apprend ?

3-1 Quelles différences entre savoir et connaissance ?

Margolinas (2012, p.7), distingue la notion de savoir qui est « une construction sociale et culturelle, qui vit dans une institution et qui est par nature un texte (ce qui ne veut pas dire qu'il soit toujours matériellement écrit). Le savoir est dépersonnalisé, décontextualisé, détemporalisé. Il est formulé, formalisé, validé et mémorisé. Il peut être linéarisé, ce qui correspond à sa nature textuelle », d'une connaissance qui se définit comme « ce qui réalise l'équilibre entre le sujet et le milieu, ce que le sujet met en jeu quand il investit une situation. Il s'agit d'un concept très large, qui inclut à la fois des connaissances du corps, des connaissances dans l'action, des connaissances de l'interaction, des connaissances mémorisées, etc. »

La didactique des sciences et ensuite, de façon opérationnelle, les environnements d'apprentissage, se situent dans cette circulation entre connaissance et savoir. En effet, le savoir donné à étudier provient toujours d'une demande institutionnelle et ce que doivent construire les individus sont des connaissances qui vont leur permettre d'analyser une

situation (par exemple, émettre des hypothèses pour résoudre un problème) ou encore de permettre une action (par exemple, résoudre le problème).

3-2 Qu'est-ce qu'une connaissance du point de vue de l'apprentissage ?

Selon Anderson (2000), une connaissance est un élément de notre mémoire qui nous permet de reconnaître le monde qui nous entoure, d'interpréter, de comprendre notre environnement, mais aussi d'agir sur celui-ci. Ce que l'on a appris est mobilisable dans des situations qui ne ressemblent pas nécessairement à la situation source de l'apprentissage. En particulier, dans les domaines scientifiques et technologiques, les apprentissages ont pour objectifs d'élaborer chez les apprenants, des connaissances qui pourront être mobilisées dans leur parcours scolaire au fur et à mesure des passages dans la classe supérieure, puis dans la formation professionnelle et finalement dans leur futur métier. Selon l'approche sociologique de Trottier (2005, p. 77 et 78), « le système éducatif et les entreprises ont davantage qu'auparavant des préoccupations communes et assument des responsabilités conjointes dans la planification des enseignements, la sélection des savoirs et la formation des compétences. Le déploiement de ce nouveau modèle a coïncidé avec l'émergence d'un nouveau mode d'organisation du travail et d'un nouveau type de qualification sur le marché de l'emploi (Bernier 1990). On s'attend aujourd'hui à ce qu'un individu soit capable non seulement d'exécuter une tâche étroite comme dans le modèle taylorien mais aussi d'assumer une fonction plus complexe, qu'il soit plus polyvalent et fasse appel à des savoirs plus abstraits qui le rendent apte à poser un diagnostic et à s'inscrire dans un processus de résolution de problème ». Dans ce contexte, où ce qui est appris à l'école devra être transféré dans des activités de nature différente, il est important de préciser la notion de connaissances sous ses différents formats pour repérer leurs domaines d'application et pour concevoir des environnements d'apprentissage qui permettent de les faire évoluer de façon ciblée et avec le maximum de pertinence.

3-3 Quels sont les différents formats de connaissances ?

Musial, Pradère et Tricot (2011), présentent les connaissances humaines en les catégorisant selon six formats différents, ces formats correspondant à des processus d'apprentissage particuliers. Contrairement à la proposition d'Anderson et al. (2001), qui mettait à jour la taxonomie de Bloom, ces auteurs n'établissent aucune hiérarchie entre les différents formats de connaissance et considèrent même que certaines connaissances n'existent pas selon certains formats. Pour illustrer leur propos, ces auteurs prennent l'exemple du théorème de Pythagore. Ce théorème (ce savoir) peut être investi dans plusieurs types de situations :

- énoncer par cœur le théorème ;
- comprendre la démonstration du théorème ;
- utiliser le théorème pour résoudre un problème particulier ;
- comprendre la situation où il est utilisé ;
- transposer son utilisation sur un chantier sans faire des calculs (règle du 3, 4, 5 des maçons).

Chacune de ces situations mobilisent bien le même savoir mais sous des formats de connaissance différents, qui peuvent être indépendants les uns des autres. Par exemple, l'utilisation de la règle du 3, 4, 5 des maçons ne nécessite pas de connaître la démonstration du théorème et, en retour, il n'est pas sûr que tous les professeurs de mathématiques pensent à utiliser cette règle pour vérifier une perpendicularité dans une activité personnelle.

Les six formats de connaissances sont définis selon leur domaine de validité (générales vs particulières) et leur champ d'application (analyse vs action). La figure 4 permet de repérer les six formats dans quatre quadrants définis par un axe horizontal qui spécifie le champ d'application et un axe vertical qui spécifie le domaine de validité.

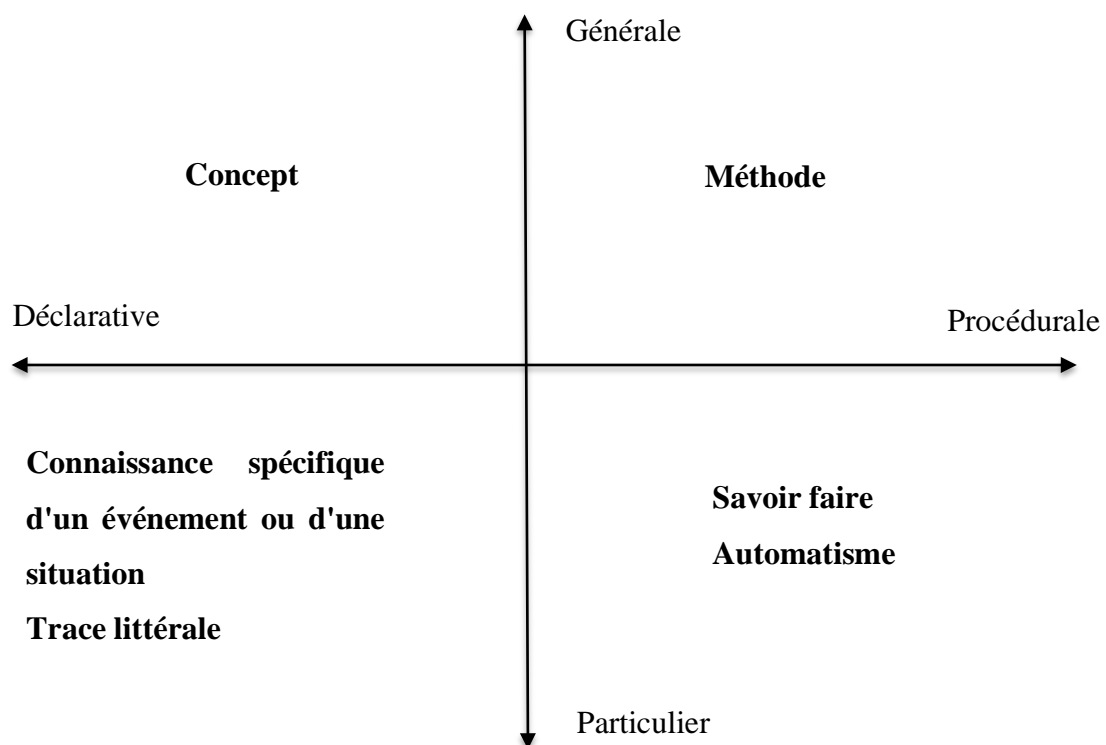


Figure 4 : Les six formats de connaissances selon Musial, Pradère et Tricot (2011)

Au niveau du champ d'application, les connaissances déclaratives (qui correspondent à des connaissances théoriques et plus précisément, selon Gagné (1985) à la connaissance de faits, de règles, de lois, de principes permettant d'analyser une situation) sont opposées aux connaissances procédurales (qui correspondent aux étapes pour réaliser une action, à la procédure permettant la réalisation d'une action).

Au niveau du domaine de validité, les connaissances générales (mobilisables dans de nombreuses situations) sont opposées aux connaissances particulières (ou contingentes).

Ainsi, en gardant l'exemple du théorème de Pythagore :

- le format de connaissance « méthode » correspond à la manière de l'utiliser dans des situations diverses et variées. La méthode consiste alors à repérer les segments perpendiculaires d'un triangle rectangle et d'appliquer le théorème. Le fait que cette connaissance porte un caractère général permet à son détenteur de l'utiliser dans des situations qui ne montrent pas explicitement un triangle rectangle comme dans un problème de mathématiques. Musial, Pradère et Tricot soulignent qu'une méthode peut aussi avoir comme objectif la compréhension d'un système, d'une situation (par exemple la télémétrie LASER) ;
- le format de connaissance « concept » est une connaissance déclarative mobilisable dans de nombreuses situations. Dans ce cas, le détenteur de cette connaissance peut aussi bien le décrire dans le domaine du calcul de la longueur de l'hypoténuse d'un triangle rectangle que dans les domaines de la vie quotidienne ;
- le format « connaissance spécifique d'un événement ou d'une situation » est une connaissance déclarative mobilisable dans un nombre restreint de situations. Une telle connaissance peut exister sans véritable lien avec d'autres connaissances spécifiques ; elle correspond à la compréhension d'un cas, d'un exemple, d'un système, d'une figure, d'un texte, bref à ce qu'on appelle un « modèle de situation » en psychologie de la compréhension ;
- le format de connaissance « trace littérale » est aussi une connaissance déclarative mobilisable dans un nombre restreint de situations. Typiquement, elle correspond à l'énoncé du théorème sous sa forme littérale, elle ne permet pas de comprendre, ni d'agir dans la situation ;

- le format de connaissance « savoir-faire » est une connaissance procédurale mobilisable dans une situation particulière qui consiste en une séquence d'actions physiques et/ou d'opérations mentales que l'on est capable de mettre en œuvre de manière contrôlée. Dans le cas du théorème de Pythagore, la corde à 13 nœuds des égyptiens ou encore la règle du 3, 4, 5 des maçons sont des savoir-faire qui permettent de faire des mesures de longueur ou de perpendicularité sur des chantiers ;
- le format de connaissance « automatisme » est une connaissance procédurale particulière dans un domaine de validité restreint dont le déclenchement est irrépressible et ne peut être interrompu. La mise en œuvre d'un automatisme ne nécessite pas d'attention. Le théorème de Pythagore est un exemple de connaissance qui semble difficilement exister sous le format « automatisme ».

Un même savoir scolaire peut correspondre à différents formats de connaissances chez les individus. Un élève peut avoir conceptualisé le théorème de Pythagore et/ou savoir le mettre en œuvre. Il s'agit bien de connaissances différentes, qui vont être utilisées de façons différentes, avec une validité différente. Ainsi, apprendre peut consister à transformer une connaissance d'un format vers un autre.

Les connaissances sont mobilisées dans toutes les situations de la vie personnelle, scolaire ou professionnelle des individus car le fait même d'agir sur le monde nécessite de faire appel à ses connaissances. Les connaissances apprises peuvent être restituées sous plusieurs formes selon la situation où elles sont mobilisées. A l'école, les connaissances sont principalement évaluées sous la forme d'un simple rappel ou à travers des activités de compréhension. Dans la vie personnelle, pour des actions finalisées, les connaissances sont plutôt utilisées pour la compréhension et bien souvent à transférer dans des situations nouvelles.

3-4 Le rappel, la compréhension et le transfert des connaissances

L'apprentissage renvoie à la fois à des processus d'acquisition de l'information mais aussi à des processus de construction actifs par les apprenants. L'apprentissage dans un environnement complexe passe par l'élaboration et le stockage en mémoire à long terme de représentations symboliques de différentes natures. A l'école, les connaissances secondaires sont apprises pour être mobilisables dans différentes situations d'évaluation. Trois grandes formes d'évaluation sont généralement utilisées. Elles seront utilisées précisément de cette manière dans cette thèse : la première, le rappel, permet de mesurer ce que l'apprenant a

retenu de ce qui est présenté explicitement dans le matériel d'apprentissage. Le format de connaissance associé est le format « trace littérale ». La deuxième, la compréhension, par la résolution de problèmes dans un contexte similaire à celui de la situation d'apprentissage, permet de vérifier si l'apprenant a bien élaboré un modèle de la situation dans laquelle il a construit ses connaissances. Le format de connaissance associé est la « connaissance spécifique d'un événement ou d'une situation ». La troisième forme d'évaluation est le transfert. Le transfert d'une connaissance est essentiellement une forme de recontextualisation. Le transfert se produit lorsqu'une connaissance acquise dans une situation A peut être reprise d'une façon judicieuse et fonctionnelle dans une situation B et dans l'idéal, N+1 situations. Le format de connaissance associé est le « concept ».

4- Complexité des environnements et apprentissage

Les humains sont en permanence confrontés à la complexité, que ce soit dans les situations quotidiennes, dans les rapports avec les autres, ou plus globalement dans les relations avec le monde. Ces expériences de la vie courante forcent notre adaptation, conditionnant ainsi l'intégration de nouvelles connaissances. Or dans le contexte scolaire, les enseignants, par souci d'efficacité, simplifient, « élémentarise » le savoir en pensant faciliter l'apprentissage de l'élève. Ce mode d'enseignement implique, la plupart du temps, de soustraire les connaissances à apprendre de leur contexte d'origine. Ainsi, l'enseignement contribue d'une certaine manière à dénaturer le savoir, à le mutiler, empêchant l'accès à une globalité qui donne un sens à l'apprentissage. L'élève est alors confronté à la difficulté de devoir reconstituer la complexité d'un savoir à partir d'éléments distincts à relier, et qui, présentés séparément, n'ont pas de sens. On éprouverait la même difficulté à devoir réaliser un puzzle sans son modèle. Par exemple, les CEFEDM (CEntres de Formation des Enseignants de la Danse Et de la Musique) soutiennent que l'apprentissage de la musique donne de meilleurs résultats lorsque les apprenants sont confrontés directement à la complexité d'une œuvre musicale, elle induit alors de la motivation en donnant du sens aux apprentissages (Tepe, 2008).

Dans la complexité, il y a un rapport des parties au tout, et du tout aux parties. Selon Morin (1990, p. 11), « la complexité apparaît certes où la pensée simplifiante défaille, mais elle intègre en elle tout ce qui met de l'ordre, de la clarté, de la distinction de la précision dans la connaissance. Alors que la pensée simplifiante désintègre la complexité du réel, la pensée complexe intègre le plus possible les modes simplifiants de penser, mais refuse les

conséquences mutilantes, réductrices, unidimensionnalistes et finalement aveuglante d'une simplification qui se prend pour le reflet de ce qu'il y a de réel dans la réalité ».

Pour les apprentissages de connaissances secondaires, la confrontation directe à des situations complexes permet de construire des connaissances qui ne sont pas immuables, envisagées comme des vérités absolues, mais de les considérer comme des connaissances adaptables, relatives à un contexte précis et modulables en fonction de la situation à traiter.

5- Conclusion du chapitre 1

Apprendre des connaissances permet une adaptation du comportement des individus face aux sollicitations de l'environnement. Nous avons identifié deux types de connaissances : les connaissances primaires et les connaissances secondaires. Les connaissances primaires, héritage de l'évolution biologique, sont apprises sans efforts, sans motivation et sans enseignement mais elles ne permettent de répondre qu'à des sollicitations nécessaires à la survie de l'espèce ce qui n'enlève rien à leur extrême complexité.

Contrairement à l'apprentissage de connaissances primaires, l'apprentissage de connaissances secondaires nécessite des efforts, de la motivation et, le plus souvent, un enseignement explicite. Elles permettent de traiter des situations nouvelles au sens de l'évolution comme la lecture, le calcul formel ou encore la mécanique quantique.

Souvent, les connaissances secondaires doivent être enseignées pour être apprises. Elles peuvent résulter d'un apprentissage par imitation ou bien être acquises à l'école dans une salle de classe à l'aide d'un environnement d'apprentissage construit par des enseignants. Dans ce dernier cas, l'apprentissage de connaissances secondaires ne se fait pas de manière adaptative et nécessite le développement de séquences pédagogiques qui doivent prendre en compte les caractéristiques affectives, conatives et cognitives des apprenants.

L'école est un lieu particulier pour apprendre des connaissances secondaires. Elle permet de combler les lacunes des apprentissages adaptatifs. La plupart des sociétés modernes sont dans l'obligation d'ouvrir des écoles pour que leurs enfants n'apprennent pas uniquement ce qui leur sert au quotidien et ce que savent déjà leurs parents. L'école est utile à la société pour que les enfants deviennent des citoyens qui participent à la vie sociale, économique en apprenant un métier, la vie en démocratie, des connaissances sur le monde.

Pour développer des environnements d'apprentissage efficaces, il est nécessaire de vérifier la correspondance entre le format des connaissances visées et les processus d'apprentissage mis en œuvre. Lors du choix des supports d'enseignement et de la conception

des tâches à réaliser pour que les élèves apprennent, trois théories apparaissent contradictoires mais complémentaires. Choisir des supports complexes et des tâches complexes permet de confronter l'apprenant à des situations authentiques des réalités de la vie, plus motivantes car moins artificielles, moins secondaires (théories de la pensée complexe) favorisant ainsi un engagement cognitif actif de l'apprenant, et donc la rétention en mémoire (théorie des *desirable difficulties*) mais cela conduit à des traitements difficiles à réaliser par la mémoire de travail, parfois aux dépens de l'apprentissage (théorie de la charge cognitive).

Pour la conception des environnements d'apprentissage, une gestion de la complexité est donc nécessaire et les approches des parties vers le tout ou bien du tout vers les parties sont des stratégies à évaluer pour optimiser l'intégration des connaissances.

Chapitre 2 :

Les limites et les atouts du système cognitif humain dans les processus d'apprentissage de connaissances secondaires

Introduction

Le système cognitif humain est un dispositif de traitement complexe capable d'acquérir, de conserver, de traiter et de transmettre des informations. Pour ce qui concerne le sujet de cette thèse, le système cognitif sera étudié dans le contexte des apprentissages non adaptatifs c'est-à-dire à partir d'enseignements directs et explicites. De nombreux travaux ont contribué à proposer des modèles pour décrire la structure et le fonctionnement du système cognitif. Nous retiendrons ici le modèle proposé par Atkinson et Shiffrin (1968), encore d'actualité dans le cadre de l'étude des apprentissages, qui postule la présence d'un couple mémoire de travail - mémoire à long terme au sein du système cognitif (fig 5).

Nous proposerons une revue des différents modèles de la mémoire de travail puis nous examinerons ses limites dans le cas des apprentissages de connaissances secondaires où elle est fortement mise à contribution quand les informations nécessaires au traitement de la situation sont nombreuses et en interactions les unes avec les autres.

Ensuite, nous porterons notre attention sur les aspects fonctionnels et structuraux de la mémoire à long terme sous l'angle des apprentissages puis nous insisterons sur les atouts et les limites du couple mémoire de travail - mémoire à long terme dans le contexte des apprentissages.

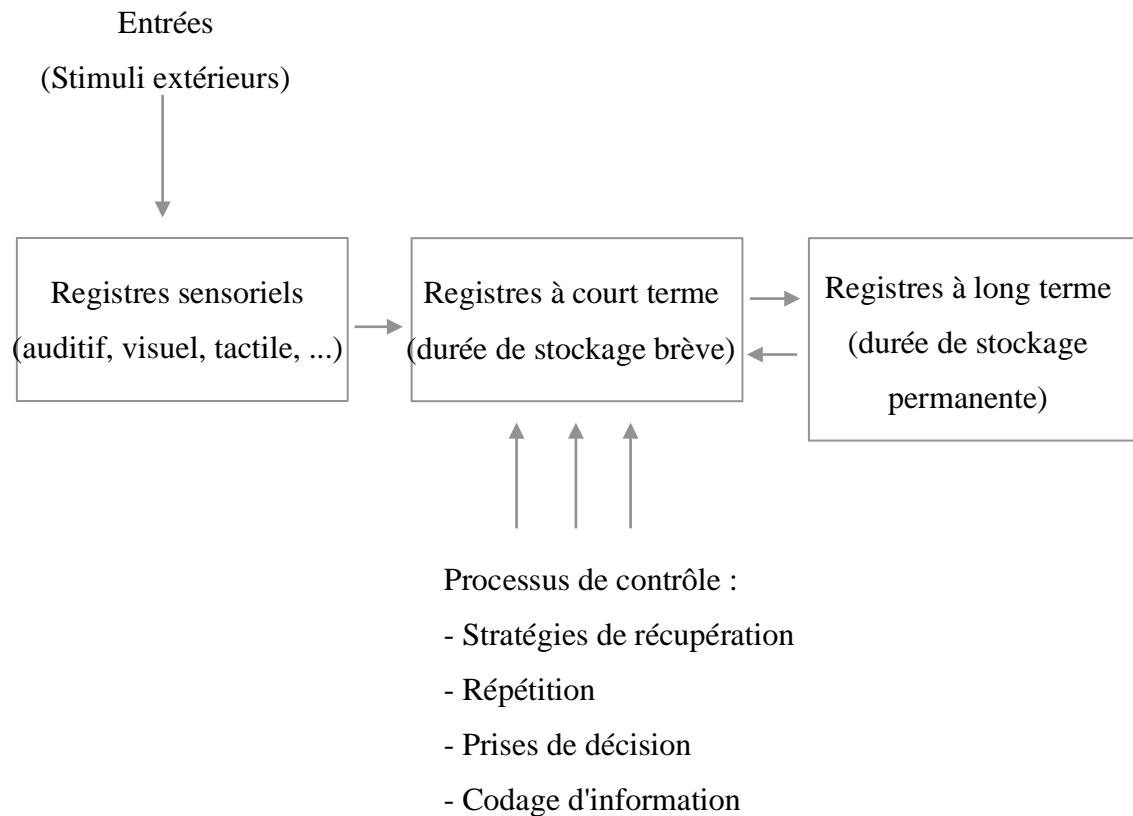


Fig 5 : Le modèle simplifié de la mémoire humaine d'après Atkinson et Shiffrin

1- La mémoire au centre du système cognitif

1-1 Approche historique

C'est à la fin du XIX^{ème} siècle que les premiers travaux sur la mémoire sous le versant psychologique sont apparus. Ebbinghaus est considéré comme le premier à avoir mis en place des paradigmes expérimentaux pour l'étude de la mémoire. Il a en particulier largement contribué à établir la distinction entre deux types de mémoire, la mémoire implicite mesurée par l'économie au réapprentissage et la mémoire explicite mesurée à l'aide de performances en rappel de souvenirs (Nicolas, 2014). A la même époque, William James (1890) distingue ce qu'il appelle la mémoire primaire de la mémoire secondaire. La mémoire primaire serait, selon lui, capable de retenir un petit nombre d'informations, immédiatement présentes à l'esprit, alors que la mémoire secondaire contiendrait un nombre pratiquement illimité de connaissances qui nécessitent un effort pour être rappelées. Cette dernière approche fut un grand précurseur des modèles qui ont été proposés au cours du siècle dernier et notamment celui de Atkinson et Shiffrin en 1968. Notons que cette conception dualiste de la mémoire n'a

pas fait l'unanimité mais la question de la dissociation et plutôt liée à des conceptions fonctionnelles que structurelles. Elle est par exemple remise en cause par Craik et Lockhart (1972) et Wickelgren (1973). D'autres auteurs ne remettent pas en cause la présence de la mémoire de travail et de la mémoire à long terme mais proposent une conception de la mémoire de travail comme une zone temporairement activée de la mémoire à long terme. Différentes idées sont proposées : le modèle de la diffusion de l'activation (Anderson, 1983), le focus attentionnel en mémoire de travail comme zone activée en mémoire à long terme (Cowan, 2001) ou encore la mémoire de travail à long terme (Ericsson & Kinch, 1995). Par exemple, ce dernier modèle semble être actuellement une base intéressante pour expliquer la construction de l'expertise. Pour ce qui concerne plus particulièrement la mémoire de travail, plusieurs modèles ont été proposés avec des hypothèses structurelles différentes, Baddeley (1986) et Baddeley et Hitch (2000) pour une conception modulaire, Cowan (2001) pour une conception unitaire. D'autres auteurs ont proposés des approches fonctionnelles. Par exemple, les modèles de la mémoire de travail contrainte par le temps comme celui de Towse et Hitch (1995) ou plus récemment celui de Barrouillet et Camos (2007).

1-2 Système cognitif et apprentissages

Dans le cadre de l'étude des apprentissages, c'est le comportement du système cognitif qui est au centre des préoccupations des chercheurs. Pour améliorer l'apprentissage, c'est-à-dire créer de nouvelles connaissances, enrichir celles qui sont déjà présentes et les utiliser dans des situations nouvelles, il est nécessaire de connaître les limites et les atouts des différentes composantes de l'architecture du système mnésique. D'un point de vue structurel, sur la base du modèle d'Atkinson et Shiffrin (1968), nous retiendrons ici que l'architecture cognitive sous-jacente aux phénomènes d'apprentissage est constituée de la mémoire de travail et de la mémoire à long terme. La mémoire à long terme peut être considérée comme une fonction adaptative de l'humain à son environnement culturel, social et affectif (Anderson, 1995 ; Schacter, 2001). Cette fonction consiste à réduire le coût de traitement des situations les plus fréquemment rencontrées alors qu'elle maintient un coût élevé pour le traitement des situations inhabituelles. D'un point de vue comportemental, malgré les limites étroites des performances de la mémoire de travail prise seule, son association avec la mémoire à long terme offre un ensemble qui offre des performances très élevées dans des situations de traitement simples et routinières comme dans des circonstances où le traitement de la situation devient très complexe.

2- La mémoire de travail : modèles et limites fonctionnelles

2-1 Les différents modèles de la mémoire de travail

Du fait de la place incontournable de la mémoire de travail au sein du système cognitif et de son importance dans la réussite scolaire (Gavens & Camos, 2006), l'étude de son fonctionnement et de sa capacité ont fait l'objet de nombreuses propositions de modèles théoriques et de recherches empiriques (cf. la synthèse de Miyake & Shah, 1999). Nous allons présenter ici les modèles les plus renommés. Pour chacun des modèles, les auteurs montrent que la mémoire de travail fonctionne sur la base d'une quantité limitée de ressources attentionnelles et proposent différents scénarios pour en décrire le fonctionnement.

2-1-1 Le modèle de Baddeley et Hitch (1986, 2000)

Ce modèle, initié en 1974, a fait l'objet de réactualisations jusqu'à récemment. Le modèle de Baddeley et Hitch (1974) est de conception modulaire, organisé autour d'un administrateur central et de deux sous systèmes esclaves : la boucle phonologique et le calepin visuo-spatial. L'administrateur central peut, en première approximation, être identifié à une capacité d'attention et de traitement des données. Il coordonne les opérations des deux sous systèmes esclaves, il gère le transfert des informations vers la mémoire à long terme mais n'a pas une fonction de mémoire à proprement dite. Les fonctions de maintien temporaire de l'information sont assurées par la boucle phonologique impliquée dans le stockage et le rafraîchissement de l'information verbale et le calepin visuo-spatial, responsable du maintien des informations visuelles et de la manipulation des images mentales. Ces auteurs postulent que les processus de traitement et de maintien sont soumis à la capacité limitée de l'administrateur central. Les actions de traitement et de maintien des informations seraient alors en compétition et conduiraient à un partage des ressources. Cette hypothèse expliquerait que toute consommation de ressources nécessaires au maintien se ferait au détriment des ressources disponibles pour les traitements, entraînant une dégradation de la performance. Inversement, plus le traitement serait coûteux et plus les ressources disponibles pour le maintien diminueraient, conduisant à l'oubli de l'ensemble ou d'une partie seulement de l'information à maintenir en mémoire. En 2000, dans sa version récente du modèle, Baddeley ajoute un troisième système esclave, le *buffer* épisodique. Ce buffer est multimodal car il peut contenir des informations à la fois visuelles, auditives, ou autres. Il se comporte comme une interface temporaire entre la boucle phonologique, le calepin visuo-spatial et la mémoire à long terme et il joue un rôle important dans l'encodage et la récupération d'information en mémoire

épisode. Ce modèle théorique est encore actuellement un des plus utilisés pour rendre compte des processus de maintien à court terme de l'information. Le modèle de Baddeley et Hitch définissant un administrateur central comme composante principale de la mémoire de travail complété par la proposition de Norman et Shallice (1986) invoquant un "système attentionnel de supervision" permet d'introduire la notion de ressources attentionnelles dans le contrôle et la planification des opérations de traitement.

2-1-2 Le modèle de Cowan (2001)

Le modèle de Cowan (2001), de conception unitaire, est radicalement différent de celui de Baddeley et Hitch (2000). Cowan propose un modèle fonctionnel de la mémoire de travail avec une composante de traitement et une composante de stockage. Dans ce modèle, qu'on pourrait dire emboîté, on distingue seulement des éléments plus ou moins activés en mémoire les rendant accessibles pour les tâches en cours, associé à des mécanismes permettant leurs traitements. Il n'y aurait pas de distinction entre la mémoire de travail et la mémoire à long terme, la mémoire de travail serait une sous-partie de la mémoire à long terme composée d'informations activées pour traiter une situation donnée à un moment donné. Parmi toutes les informations mises en relief par la tâche à réaliser, un certain nombre d'entre elles se trouvent dans un état d'activation très élevé correspondant à ce que Cowan désigne comme le focus attentionnel. Pour Cowan, les éléments activés peuvent être placés dans le focus attentionnel de façon active et volontaire (attention endogène) pour traiter une situation connue ou bien de façon automatique lorsqu'un événement non attendu apparaît dans l'environnement (attention exogène).

2-1-3 Le modèle de Towse et Hitch (1995)

L'idée d'un réservoir commun de ressources dédiées au maintien et au traitement de l'information a été remise en question par Towse et Hitch (1995). Ces auteurs ont introduit le concept de mémoire de travail contrainte par le temps. Selon ces auteurs, la force des traces mnésiques dans l'espace de stockage de la mémoire de travail s'affaiblirait à mesure que l'intervalle de temps entre le stockage et le rappel augmenterait. Ils supposent ainsi que les traces mnésiques diminuent spontanément au cours du temps sauf si l'attention se porte sur elles, d'où la nécessité du rafraîchissement. Le *task-switching model* proposé par Towse et Hitch est fondé sur la notion de déclin mnésique. Les auteurs conservent l'idée d'une structuration modulaire et supposent qu'il existe une ressource attentionnelle qui peut être utilisée soit pour rafraîchir les traces mnésiques des items à retenir, soit pour traiter les

informations relatives à la tâche en cours.

2-1-4 Le modèle de Barrouillet et Camos (2007)

Le modèle du partage temporel des ressources (*time based resource sharing model*) conjugue l'idée du partage des ressources du modèle de Baddeley avec l'idée du déclin temporel de l'information du modèle de Towse. Cette proposition est aussi fondée sur l'hypothèse que le traitement et le maintien de l'information demande de l'attention puisée dans une quantité de ressources limitée et dans le même esprit que pour le modèle de Towse, dès que l'attention n'est plus portée sur le maintien de la trace mnésique, celle-ci disparaît avec le temps. Par contre, elles peuvent être rafraîchies si l'attention se porte à nouveau sur elles. La différence avec le modèle de Towse réside dans l'hypothèse que le rafraîchissement des traces mnésiques ne se fait pas en alternant simplement les opérations de traitement et de maintien de l'information en mémoire mais en utilisant des micro-pauses durant les opérations de traitement.

2-1-5 La mémoire de travail à long terme (Ericsson et Kintsch, 1995)

Contrairement aux modèles qui dissocient radicalement la mémoire de travail et la mémoire à long terme, ce modèle, proposé par Ericsson et Kintsch (1995), est fondé sur l'idée que les humains sont capables d'utiliser une partie de leur mémoire à long terme comme mémoire de travail. C'est d'une part à partir de l'étude des performances cognitives hors du commun telles que celles mobilisées par les grands calculateurs et par les joueurs d'échec (Binet, 1894) et d'autre part depuis l'émergence du concept de *chunking* proposé par De Groot (1965) que ce modèle permet d'expliquer la contradiction qui existe entre les limites étroites de la capacité de la mémoire de travail et les performances que les experts peuvent montrer dans des situations complexes. Selon Gobet et al. (2001), un *chunk* est « un assemblage d'éléments ayant fort un lien entre eux mais de faibles liens avec les éléments d'un autre *chunk* ». Pour illustrer cette définition, nous pouvons prendre l'exemple des deux séries de dix caractères suivantes : « 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 » et « a b c d e f g h i j ». Si nous remarquons que ces séries sont composées respectivement des dix premiers chiffres rangés dans l'ordre croissant et des dix premières lettres de l'alphabet, il est possible de simplifier le matériel à traiter en faisant appel aux connaissances que nous avons sur les chiffres et les lettres en mémoire à long terme. Pour établir cette modélisation, Ericsson et Kintsch ont suggéré que la mémoire à long terme possède une structure spécifique, qu'ils appellent « mémoire de travail à long terme (MDT-LT) » dédiée au stockage d'indices de récupération de connaissances spécifiques elles

mêmes stockées en mémoire à long terme. La simple activation de cette structure de récupération permet d'activer toutes les connaissances requises pour réaliser une tâche donnée. En revanche, l'idée d'une MDT-LT n'est valide que dans le cas de tâches réalisées par des experts, elle n'est donc pas généralisable à toutes les activités. Guida, Tardieu et Nicolas (2009) ont fait état des principales critiques adressées sur ce modèle. Ils citent par exemple Miyake et Shah (1999) pour qui le modèle ne s'applique pas de façon symétrique dans le rappel des chiffres et dans la compréhension de texte ou encore Gobet (2000) qui reproche à ce modèle d'être trop vague. En conclusion, Guida, Tardieu et Nicolas (2009) précisent que « le concept de MDT-LT est une théorie générale de la mémoire, ce qu'elle perd dans la précision des prédictions qu'elle peut fournir, elle le gagne dans le spectre de son application à des domaines variés ».

Tous ces modèles ont en commun l'idée que la mémoire de travail est limitée en termes de durée de stockage et de quantité d'informations à traiter simultanément. Pour apprendre de nouvelles connaissances ou bien transformer celles qui sont existantes, la mémoire de travail, sollicitée pour traiter les nouvelles informations présentes dans l'environnement, sera le maillon « faible » du système cognitif. Si l'environnement d'apprentissage présente de trop nombreuses informations simultanément, la mémoire de travail ne pourra pas les traiter et l'apprentissage sera compromis. Une gestion de la quantité d'information et des interactions entre les informations est nécessaire pour éviter la surcharge de la mémoire de travail et ainsi permettre les apprentissages.

2-2 Les limites de la mémoire de travail

Lorsque les humains sont dans des situations de traitements contrôlés (par exemple, garer sa voiture dans un parking souterrain où les emplacements sont exigus), il est très facile d'observer que le système cognitif peut être très vite mis en difficulté par l'ajout d'une tâche complémentaire (par exemple, répondre aux questions d'un passager). Quels que soient les modèles de la mémoire de travail proposés par les chercheurs, la difficulté pour faire des traitements complexes est expliquée par la limitation en ressources attentionnelles immédiatement disponibles. La capacité de la mémoire de travail ne se réduirait pas simplement au stockage ou au traitement d'informations, mais à la capacité à contrôler et maintenir l'attention sur eux. Dans cette perspective, le terme de capacité de mémoire de travail, mesurée à l'aide de tâches dédiées, reflèterait plus spécifiquement l'efficacité de la

composante attentionnelle (Unsworth et al., 2005).

Dans les situations d'apprentissage, nous pouvons repérer deux situations pour lesquelles la mémoire de travail peut se trouver en fonctionnement dégradé (Pollock, Chandler & Sweller, 2002). Premièrement, lorsque la quantité d'informations à maintenir simultanément en mémoire est importante, le maintien des informations nécessaires à la réalisation des opérations de traitements demeure alors difficile voire impossible. Deuxièmement, le traitement à partir d'éléments d'informations très interactifs, le système attentionnel est alors mis à forte contribution pour gérer des phases d'inhibitions.

2-2-1 La quantité d'information à maintenir simultanément en mémoire de travail

Miller en 1956 a été le premier à montrer que la quantité maximum d'unités d'information que la mémoire de travail peut maintenir en provenance de l'environnement (par l'intermédiaire du registre d'information sensorielle) ou bien de la mémoire à long terme est limitée et variable selon les individus. Une unité mnésique peut être une simple information mais aussi un regroupement d'unités d'informations (par exemple, un acronyme comme SNCF). La mesure du nombre maximum d'unités mnésiques stockables simultanément donne l'empan mnésique. La taille moyenne de cet empan serait de 7 plus ou moins 2 selon Miller (1956), de 4 selon Cowan (2001). Guida, Tardieu et Nicolas (2007) citent aussi Gobet et Clarkson (2004) pour qui l'empan serait de 2, Garavan (1998) et McElree (2001) qui montrent que l'empan moyen se réduit à un seul item. Par ailleurs, si l'empan mnésique reste très restreint, la durée du stockage est elle aussi très limitée, elle serait d'une vingtaine de secondes en moyenne (Peterson & Peterson, 1959).

2-2-2 Les unités d'information fortement interactives

Sweller (1994) et Sweller et Chandler (1994) ont suggéré que le degré d'interactivité entre les éléments qui composent un matériel d'apprentissage devient un facteur critique dans la mesure où les éléments doivent être traités simultanément pour accéder à la compréhension de la totalité. Dans les travaux de recherches en *Instructional Design*, l'interactivité entre les éléments d'un matériel présenté aux apprenants est une variable fréquemment contrôlée (Pollock, Chandler & Sweller, 2002 ; Tindall-Ford, Chandler & Sweller, 1997).

L'interactivité entre plusieurs unités d'information apparaît lorsqu'elles sont connectées entre elles par des lois, des règles, des relations ou en encore des principes. A titre d'exemple, en thermodynamique, la loi d'Avogadro qui décrit le comportement des gaz parfaits à basse pression est formulée de la manière suivante :

$$P.V = n.R.T$$

P est la pression du gaz, V son volume, n le nombre de moles de molécules, R est la constante des gaz parfaits et T , sa température. Cette loi permet d'exprimer la dépendance entre trois grandeurs caractéristiques de l'état d'un gaz : pour garder la température du gaz constante pendant une augmentation de pression, il est nécessaire de diminuer son volume. Lorsque la température augmente à volume constant, la pression du gaz s'élève (ce qui conduit à faire exploser les bouteilles de gaz dans les incendies). Lorsque la pression diminue à volume constant, la température diminue (c'est le cas des bombes aérosols qui refroidissent quand on les utilise). Pour comprendre l'ensemble, c'est-à-dire prévoir l'évolution de l'état du gaz en fonction des variations des grandeurs P , V et T , il est nécessaire de les maintenir en mémoire de travail et de les traiter simultanément. Ces opérations sont très difficiles pour un apprenant novice dans le domaine de la thermodynamique, elles le sont d'autant moins si son niveau d'expertise est grand.

2-3 Mémoire de travail et apprentissages

En tant que centre exécutif du système cognitif, la mémoire de travail joue un rôle essentiel dans les activités contrôlées nécessaires au traitement des informations impliquées dans les apprentissages. En effet, c'est elle qui permet le stockage et le traitement des informations nécessaires à la construction ou à l'enrichissement des schémas mentaux en faisant appel aux connaissances déjà présentes en mémoire à long terme et aux unités d'informations présentes dans l'environnement. La mémoire de travail est extrêmement sollicitée dans les apprentissages secondaires complexes comme la compréhension en lecture (Daneman & Carpenter, 1980), le raisonnement (Kane, Hambrick, Tubloski, Wilhelm, Payne, & Engle, 2004), la résolution de problèmes ou encore la compréhension des systèmes complexes. Delannoy (2007) indique que les résultats d'études développementales s'accordent sur le fait que la capacité de mémoire de travail augmente durant l'enfance (Case, 1985; Pascual-Leone & Ijaz, 1989), atteint un plafond durant le jeune âge adulte et enfin diminue au cours du vieillissement (De Ribaupierre, 2001; Salthouse, 1990). Pour faciliter les apprentissages chez les élèves, deux stratégies pourraient être envisagées : soit augmenter la capacité de la mémoire de travail avec des programmes d'entraînement (et ne pas trop se préoccuper de la qualité du matériel), soit présenter du matériel d'apprentissage en adéquation avec les

performances du système cognitif (se préoccuper de l'aspect psycho-ergonomique de la situation d'apprentissage).

2-3-1 L'augmentation des capacités de la mémoire de travail

La mémoire de travail est le meilleur prédicteur de la réussite scolaire (Gavens et Camos, 2006) mais en revanche Corbin et Camos (2013) montrent que les études portant sur les effets de l'entraînement de la mémoire de travail donnent des résultats très variables. Par exemple, Morrison et Chein (2011) soutiennent que c'est un bon outil pour améliorer la cognition générale alors que Klingberg (2010) suggère qu'il pourrait être utilisé en remédiation des individus ayant de faibles capacités de mémoire de travail. Enfin, Shipstead, Redick et Engle (2010) remettent en cause les résultats des études dans ce domaine du fait d'un manque de contrôle des expérimentations et des mesures non pertinentes.

D'un point de vue fonctionnel, chercher à augmenter les capacités de la mémoire de travail ne semble pas être une solution pour faciliter les apprentissages secondaires pour les deux raisons suivantes :

- premièrement, apprendre à pour but d'augmenter la quantité et la qualité des connaissances en mémoire à long terme, la mémoire de travail pouvant être vue comme une interface de stockage temporaire et de traitement entre l'environnement et la mémoire à long terme. Avec leur modèle de la mémoire de travail à long terme, Ericsson et Kintsch (1995) défendent l'idée que les capacités cognitives des individus sont directement liées à l'état de leurs connaissances en mémoire à long terme. Autrement dit, les performances cognitives dépendent surtout des connaissances préalables des individus sur les tâches qu'ils ont à accomplir. Dans ce modèle, la mémoire de travail fait partie de la mémoire à long terme, et à ce titre les deux mémoires ne sont pas dissociables. Pour évaluer les capacités cognitives des individus, il est alors difficile d'établir la part de l'implication de la mémoire de travail et de la mémoire à long terme. Barrett, Tugade et Engle (2004), cités par Tricot, Chanquoy et Sweller (2007), suggèrent qu'il existe des différences interindividuelles en terme de contrôle attentionnel mais précisent qu'elles sont peu étudiées. Elles auraient pour origine des différences neuro-anatomiques ou neuro-fonctionnelles au niveau du cortex préfrontal qui est le siège de l'attention et, dans le cadre des apprentissages, il serait intéressant d'étudier l'importance des différences interindividuelles qui ne sont pas liées aux connaissances préalables des apprenants ;
- deuxièmement, la capacité de la mémoire de travail est certes très limitée mais cette

limitation est le fruit de l'évolution des caractéristiques de la cognition humaine (Sweller, 2004). Le système cognitif humain est un exemple de système général de traitement de l'information que l'on trouve dans l'évolution biologique et qui obéit à cinq principes fondamentaux (pour une présentation complète en français, cf : Chanquoy, Tricot, et Sweller, 2007) : le principe de stockage de l'information, le principe d'emprunt et de réorganisation, le hasard comme principe de genèse, les limites étroites du principe de changement et le principe environnemental d'organisation et de liaison. La mémoire de travail agit comme une structure qui permet de traiter les informations nouvelles présentes dans l'environnement afin de les stocker en mémoire à long terme de façon organisée et stabilisée. Ces traitements consistent à manipuler les informations en leur appliquant des opérations de comparaison, de combinaison et d'organisation. Les limitations de la mémoire de travail en quantité d'information et en durée de maintien permettent alors d'éviter des « explosions combinatoires » lors des traitements de ces nouvelles informations. Par ailleurs, ces auteurs insistent sur le fait que ces limitations ne sont valables que pour le traitement de nouvelles informations et n'ont pas de sens pour les informations qui proviennent de la mémoire à long terme.

Pour faciliter les apprentissages secondaires, l'augmentation des capacités de la mémoire de travail n'est probablement pas une piste porteuse car les capacités cognitives ne sont pas uniquement liées aux performances de la mémoire de travail mais plutôt à l'association mémoire de travail - mémoire à long terme et surtout elle serait contre-nature puisque l'évolution biologique du système cognitif a conduit à la limiter pour donner au système cognitif humain les moyens de gérer de façon écologique les informations en provenance de l'environnement.

2-3-2 La psycho-ergonomie des environnements d'apprentissage

Les apprentissages secondaires mobilisent des traitements de situations nouvelles en provenance de l'environnement. La mémoire de travail est donc mise à forte contribution pour traiter les informations et notamment dans le cas où les apprenants n'ont aucune connaissance préalable. Dans ce cas, le hasard comme principe de genèse (Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011) peut être mobilisé avec pour conséquence un traitement par essais et tests successifs supportés par l'administrateur central. Sans connaissances préalables, il n'est pas possible d'évaluer l'efficacité d'une stratégie, ni même si elle va conduire à atteindre à un succès. Face

à un environnement d'apprentissage dense composé d'un grand nombre d'informations à traiter parfois en interaction les unes avec les autres, la mémoire de travail peut atteindre ses limites fonctionnelles et perdre des informations ou ne pas traiter les plus pertinentes. De plus, ces opérations impliquent des efforts et de la motivation. La psycho-ergonomie des environnements d'apprentissages est une réponse pour faciliter les apprentissages secondaires car cette approche cherche à prendre en compte, d'une part, les limitations naturelles de la mémoire de travail pour le traitement des informations nouvelles et, d'autre part, les connaissances préalables en mémoire à long terme des apprenants afin de construire des situations en adéquation avec les caractéristiques du système cognitif. Dans cette perspective, ce sont les supports d'enseignement et les tâches prescrites aux apprenants qui doivent être au centre des préoccupations des concepteurs de matériels d'apprentissage. Sweller (2004) suggère qu'un enseignement direct et explicite se substitue à l'administrateur central de la mémoire de travail en indiquant précisément aux apprenants comment les éléments interagissent. Autrement dit, l'enseignement permet de réduire l'incertitude de l'environnement et donc d'éviter un grand nombre d'essais au hasard infructueux et chronophages. Merrill et al. (1996) argumentent leur conviction que l'enseignement est une science et que la conception pédagogique est une discipline d'ingénierie fondée sur cette science. Ils présentent alors l'*Instructional Design* comme une discipline scientifique permettant la conception « d'environnements pédagogiques qui permettent l'acquisition de connaissances et de compétences de façon plus efficiente, plus efficace et plus attrayante ». Ces mêmes auteurs soulignent que l'*Instructional Design* n'est pas un « ensemble de procédures issues de pratiques non expérimentées, c'est un ensemble de principes scientifiques et une technologie de mise en œuvre de ces principes dans le développement d'expériences et d'environnements pédagogiques ». Parmi les principes scientifiques mobilisés dans l'*Instructional Design*, la théorie de la charge cognitive, à partir de résultats expérimentaux, montre que l'on peut favoriser les apprentissages en limitant la charge cognitive imposée par le support et par la tâche à accomplir afin de libérer des ressources pour l'apprentissage lui-même, c'est-à-dire pour l'élaboration ou la transformation de connaissances.

2-3-3 Implications dans cette thèse

Les apprentissages de connaissances secondaires à partir d'environnements complexes impliquent le traitement d'une grande quantité d'informations nouvelles en provenance de l'environnement, la plupart du temps reliées entre elles. L'idée d'augmenter la capacité de la mémoire de travail n'est pas une solution écologique car les ressources et les capacités

cognitives d'un humain sont directement liées à ses connaissances en mémoire à long terme. La mémoire de travail est considérée ici comme une entité à capacité naturellement limitée conformément à l'évolution des systèmes biologiques de traitement de l'information. Cependant, pour faciliter les apprentissages, le flux des d'informations apportées aux apprenants (quantité, durée de présentation, interactions entre les éléments) doit être particulièrement contrôlé pour ne pas conduire à perdre certaines d'entre-elles ou à placer l'individu qui apprend en surcharge cognitive. Selon l'objectif de l'enseignant et l'état des connaissances préalables des élèves, l'optimisation des sollicitations de la mémoire de travail (stockage ou traitement) sera un point d'entrée incontournable dans la construction du matériel d'apprentissage. Par leurs validations empiriques conduisant à mieux connaître les processus d'apprentissage, l'*Instructional Design* et, en particulier, la théorie de la charge cognitive seront retenues comme des bases scientifiques pour proposer des stratégies de développement d'environnements d'apprentissage performantes afin que tous les apprenants puissent se former de façon efficace et motivante.

3 – La mémoire à long terme

La mémoire à long terme est une mémoire *à priori* sans limite de capacité dans laquelle les informations sont stockées sans limite de durée pendant la vie des individus. La mémoire à long terme est depuis très longtemps étudiée sous différents angles. La distinction entre mémoire à long terme et mémoire de travail est suggérée par des études neuropsychologiques fondées sur l'observation d'une double dissociation. D'un côté, des patients atteints du syndrome de Korsakoff gardent une bonne intégrité de leur mémoire de travail mais souffrent d'une forte dégradation de leur mémoire à long terme. D'un autre côté, Shallice et Warrington (1970) rapporte la dissociation inverse chez le patient KF.

Pour les chercheurs en psychologie cognitive, les modèles classiques du système cognitif humain, apparus après la deuxième guerre mondiale s'inspirent d'un point de vue fonctionnel de la cybernétique (Wiener, 1948) et de l'architecture des systèmes informatiques d'un point de vue structurel. Ils s'articulent autour d'un dispositif de stockage permanent (la mémoire à long terme) et d'une interface qui permet de récupérer des informations en provenance de l'extérieur et de les traiter (la mémoire de travail).

Comme pour la mémoire de travail, deux approches théoriques sont proposées par les chercheurs en psychologie cognitive :

- Une approche structurale fondée sur l'idée que l'organisation de la mémoire à long terme est modulaire, fractionnée en plusieurs systèmes indépendants localisés dans des

régions différentes du cerveau.

- Une approche fonctionnelle fondée sur l'idée que la mémoire à long terme est unitaire et qui s'intéresse à ses mécanismes de fonctionnement.

Après avoir décrit rapidement ses différentes structures, nous aborderons la mémoire à long terme sous l'angle des apprentissages secondaires à partir d'environnements complexes. Dans un premier temps, la mémoire à long terme sera vue comme une fonction adaptative. Dans un deuxième temps, les mécanismes d'encodage et de récupération feront l'objet d'une attention particulière puisque ce sont ces processus qui conditionnent les transferts des informations entre la mémoire de travail et la mémoire à long terme et donc la possibilité d'apprendre et d'utiliser ses connaissances pour réaliser des tâches.

3-1 Les différentes structures de la mémoire à long terme

Dans les conceptions classiques, la mémoire à long terme est décrite selon trois modes en fonction de la façon dont elle est sollicitée. Tulving en 1972 propose de distinguer la mémoire épisodique de la mémoire sémantique. La mémoire épisodique est une structure qui stocke des informations concernant des événements datés ainsi que les relations spatio-temporelles qui les relient. La mémoire sémantique concerne les connaissances que nous avons sur le monde. Plus tard, une distinction entre mémoire déclarative et mémoire procédurale est proposée (Anderson, 1976 ; Cohen & Squire, 1980) pour faire la différence entre les connaissances de type sémantique et les connaissances qui sont activées au cours d'activités perceptives (amorçage), motrices (habiletés) qui se manifestent au travers de savoir faire ou encore de conditionnement classique ou opérant. La troisième distinction suggérée par Graf et Schacter (1985), mémoire explicite vs mémoire implicite, n'est pas structurelle mais fondée sur la manière dont sont récupérées les informations. Dans le cas de la mémoire implicite, elles sont récupérées sans faire appel à la conscience et sans intentionnalité (Roediger, 2003). A l'inverse, dans le cas de la mémoire explicite, les informations sont récupérées de façon consciente. Pour ce qui concerne l'aspect purement structurel, la figure 6 présente l'organisation de la mémoire à long terme selon Squire (2004).

Les six formats de connaissances présentés par Musial, Pradère et Tricot (2011) sont à mettre en lien avec l'organisation de la mémoire à long terme proposée par Squire (2004). En effet, nous retrouvons la distinction entre la mémoire procédurale qui stocke des connaissances de type « savoir faire » et la mémoire déclarative qui stocke des connaissances qui peuvent s'exprimer par le langage. Pour caractériser les différents types de connaissances, ces auteurs ont pris en compte une dimension relative au domaine de validité des

connaissances (connaissances ayant un domaine de validité restreint vs connaissances ayant un domaine de validité général).

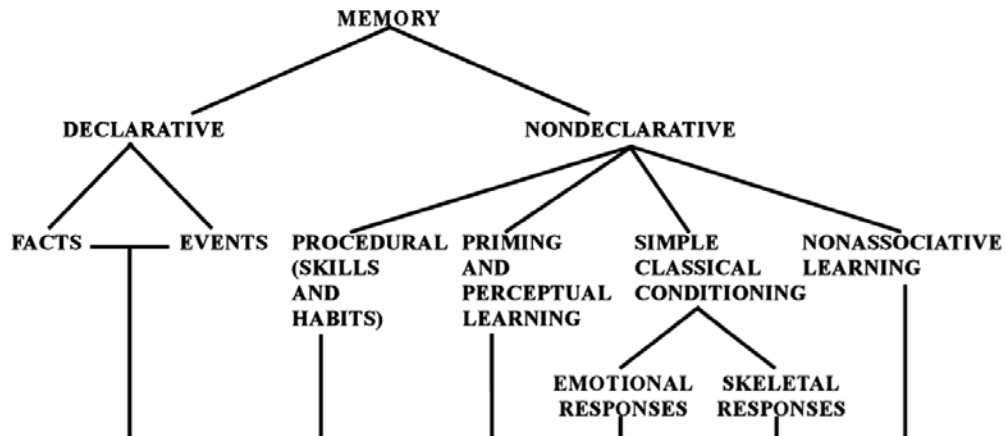


Figure 6 : Organisation de la mémoire à long terme selon Squire (2004)

3-2 Mémoire à long terme et apprentissages

Au sein du système cognitif, la mémoire à long terme est une structure qui permet le stockage d'un très grand nombre d'informations et pour une durée illimitée. La base de données, stockée sous forme de connaissances construites à partir d'observations sur le monde, a pour but de réduire le coût du traitement des sollicitations régulières de l'environnement afin d'assurer la gestion de ce qui est nouveau et peu probable. Plus précisément, la mémoire à long terme peut stocker un nombre infini de connaissances sous forme de schémas (Bartlett, 1932) ou de schèmes (Piaget, 1937). Un schéma est une connaissance qui encapsule de nombreux éléments d'informations pour ne former qu'un seul élément. Un schéma peut donc constituer une connaissance à la fois complexe, déclarative ou procédurale, qui est traitée comme une unité simple en mémoire de travail. Mobiliser un schéma est donc peu coûteux en ressources cognitives. Le but des apprentissages est de construire des schémas en mémoire à long terme, réutilisables dans différentes situations.

Pour Chi, Glaser et Rees (1982) et Sweller, van Merriënboer et Pass (1998), un schéma ne correspond pas simplement à une collection d'éléments d'informations mais aussi à une organisation de ceux-ci qui dépend de la manière dont ils seront utilisés. À titre d'exemple, dans le domaine de la compréhension de texte, pour Kintsch et van Dick (1983) un schéma est composé d'une scène et d'un script. Pour le schéma « restaurant », la scène

correspond à l'aspect statique de la situation c'est-à-dire une pièce avec de nombreuses tables déjà dressées, le script correspond à l'aspect dynamique de la situation où un serveur reçoit les clients, leur donne une carte, etc. ...

Un autre exemple, en mathématiques, dans la résolution des équations du second degré du type :

$$a.x^2 + b.x + c = 0$$

La forme de la présentation de l'équation est importante car elle permet de générer la résolution avec la procédure qui consiste à calculer le discriminant $\Delta = b^2 - 4ac$ puis donner les solutions x_1 et x_2 de l'équation avec la relation suivante :

$$x_1, x_2 = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Si la présentation initiale de l'équation n'est pas conforme à celle présentée ci-dessus, la résolution pourra poser des difficultés. Notons par exemple que, même quand les élèves arrivent à résoudre ces équations en cours de mathématiques, la résolution de cette même équation dans un problème de physique avec la variable x remplacée par la variable t reste problématique.

L'enjeu majeur de l'apprentissage de connaissances secondaires est bien de créer des schémas en mémoire à long terme. Pour construire un schéma en mémoire à long terme, les éléments d'informations qui le constituent doivent être simultanément traités en mémoire de travail. Ceci conduit à un paradoxe car il n'est pas possible de traiter des informations sans connaissances préalables et il n'est pas possible de construire un schéma sans traiter l'ensemble des informations qui le composent. Pour ne pas pénaliser les apprenants dans les apprentissages de connaissances secondaires, il est donc nécessaire de gérer une progression dans la construction des connaissances en organisant l'enseignement sur deux modalités temporelles : une première modalité, qui serait *on line* pour laquelle il est utile de vérifier que la mémoire de travail ne se trouve pas en surcharge du fait de la quantité ou du degré d'interactivité des informations à traiter et une deuxième qui serait liée à la vérification de la présence des connaissances préalables pertinentes pour l'objectif d'apprentissage visé. *L'Instructional Design* apporte des réponses dans ce domaine en proposant des scénarios basés sur la théorie de la charge cognitive.

3-3 Les mécanismes d'encodage, de stockage et de récupération

Contrairement à la mémoire de travail, la mémoire à long terme permet à l'individu de conserver des informations sur une très longue période de temps. Toutefois, une information trop longtemps inutilisée risque d'être difficilement accessible. Les données transférées en mémoire à long terme ne sont pas stockées de façon aléatoire : le stockage de l'information nécessite des liaisons à un réseau de connaissances déjà en mémoire. C'est pourquoi la mémoire à long terme n'est pas considérée comme un simple lieu de stockage mais aussi un lieu de classement et de catégorisation. Ainsi, dès la phase d'encodage, c'est-à-dire le passage de l'information de la mémoire de travail à la mémoire à long terme, l'organisation de l'information et sa liaison à un réseau de connaissances lui assure une trace durable en mémoire, ce qui facilite ensuite la phase de rappel ou de récupération. Selon Tulving (1983), l'encodage est un processus actif qui nécessite de la part de l'individu un travail d'élaboration et d'organisation des informations. L'élaboration consiste à mettre en relation les informations à traiter avec des connaissances déjà présentes en mémoire à long terme. La qualité de l'élaboration est dépendante de la profondeur de traitement des informations nouvelles. L'organisation des informations consiste à établir des liens entre les informations présentées d'une part et, d'autre part, avec les connaissances préalables des apprenants. La présentation des informations sous une forme organisée facilite l'encodage (van Patten, Chao, & Reigeluth, 1986) et selon Schimmerlick (1978), il est même essentiel que la structure qui organise l'information soit donnée à l'apprenant lorsqu'il s'agit d'un apprentissage complexe comme la lecture, l'écriture ou encore la résolution de problème. Ces deux conditions nécessaires à l'encodage des informations en mémoire à long terme sont liées aux caractéristiques de la tâche d'apprentissage qui devra alors présenter des informations structurées, organisées et reliées avec des connaissances déjà acquises puis engendrer des traitements en profondeur par des consignes de travail impliquant un degré d'engagement significatif de l'apprenant.

3-4 Apprentissage en profondeur et apprentissage en surface

Craik et Lockhart (1972) ont proposé la notion de « profondeur de traitement ». Ils suggèrent que les propriétés des connaissances en mémoire dépendent de la nature de l'activité réalisée au moment de l'encodage sur les informations traitées. Ils considèrent que la profondeur de traitement d'un stimulus varie sur un continuum d'opérations d'encodage, allant d'une simple

analyse physique du stimulus à une analyse sémantique très complexe. Les traitements superficiels fourniraient des traces faiblement récupérables alors que des traitements plus profonds seraient à l'origine des traces plus élaborées et donc mieux mémorisées.

L'apprentissage en profondeur implique l'analyse critique des informations nouvelles en les reliant à des concepts et à des principes déjà connus. L'apprentissage en profondeur favorise la compréhension et la formation des concepts pouvant être transférés dans des contextes non familiers. En revanche, l'apprentissage en surface est fondé sur l'acceptation tacite de l'information et sur la mémorisation des faits isolés et non reliés. Il ne favorise pas la compréhension et le maintien à long terme.

En 1975, Craik et Tulving ont utilisé des tâches dites d'orientation en variant les trois niveaux d'analyse : le niveau structural qui consiste à juger si le mot est écrit en majuscule ou pas ; le niveau phonétique qui consiste à demander si un mot rime avec le mot cible et finalement le niveau sémantique qui consiste à compléter la phrase par un mot cohérent. Ils ont mis en évidence que les tâches sémantiques produisent une meilleure élaboration des traces mnésiques et que cela améliore les performances dans une tâche de reconnaissance, les performances étant intermédiaires pour le niveau phonétique. Dans une deuxième expérience, ils ont manipulé la complexité des phrases en trois niveaux (simple, moyen et complexe). Les résultats montrent que la complexité des phrases améliore la restitution des mots. Un an plus tard, en 1976, la publication d'un article (Lockhart, Craik & Jacoby, 1976) a suggéré que les effets bénéfiques du niveau d'encodage seraient dus au fait que l'encodage était plus profond, plus riche, plus distinctif et unique en cas de traitement sémantique. Ils proposent que « la notion de profondeur et de degré d'élaboration d'un stimulus permet la formation d'une trace plus distinctive, plus discriminable ».

3-5 Implications dans cette thèse

La qualité de la mémorisation à long terme est très dépendante de l'encodage des informations. L'encodage nécessite un travail d'élaboration et d'organisation des informations. Il apparaît que le degré d'élaboration dépend de la profondeur de traitement et que celle-ci peut être favorisée par la présentation d'un matériel complexe. Par ailleurs, l'organisation des informations est nécessaire pour un meilleur apprentissage et il est même essentiel que la structure qui organise l'information soit donnée au moment de l'apprentissage. Ces éléments nous interrogent sur la manière de développer des outils d'apprentissage qui doivent à la fois ne pas surcharger la mémoire de travail (théorie de la charge cognitive) mais qui en même temps doivent montrer les informations à apprendre avec

un certain degré d'organisation (donc des relations) pour être mieux mémorisées à long terme. Ce dilemme nous a conduit à tester, dans la contribution empirique, une approche en deux étapes avec la présentation des informations en interaction en premier et à nous interroger sur l'opportunité d'examiner les propositions des auteurs de la théorie des *Desirable Difficulties*.

4- La mémoire de travail et la mémoire à long terme : un couple performant pour les apprentissages de connaissances secondaires ?

Le couple « mémoire de travail – mémoire à long terme » est un couple performant pour les apprentissages de connaissances secondaires si l'environnement d'apprentissage respecte les caractéristiques propres à chacune d'entre-elles et les relations qu'elles entretiennent.

Pour ce qui concerne la mémoire de travail, la démarche de conception de séquences pédagogiques devra conduire à présenter aux apprenants un environnement comportant un nombre d'informations nouvelles à traiter simultanément relativement restreint et avec peu d'interactions. Par exemple, pour des environnements très complexes, c'est-à-dire fondés sur un grand nombre d'informations en interaction, il sera incontournable d'utiliser des stratégies de présentation en plusieurs étapes de façon à limiter temporairement la quantité d'informations à traiter.

La mémoire à long terme, destinée au stockage des connaissances sous forme de schémas, devra faire l'objet d'une conception orientée vers des traitements en profondeur des informations, des renforcements de la trace mnésique de façon à rendre les connaissances disponibles et accessibles et pour certaines, automatisées.

Enfin, il est important d'insister sur le fait que le couple « mémoire de travail - mémoire à long terme » est performant du fait même de l'association de ces deux mémoires qui ont des caractéristiques fondamentalement différentes. A ce titre, la conception des environnements d'apprentissage doit effectivement respecter les limites et les atouts de chacune mais aussi proposer des stratégies qui valorisent la performance de l'ensemble. Par exemple, le fait de considérer que les apprenants ont des connaissances préalables sur le monde est sans aucun doute une entrée intéressante dans la démarche de conception pour des apprentissages à partir d'environnements complexes.

5- Conclusion du chapitre 2

Le système cognitif humain est organisé autour d'une mémoire de travail qui, prise seule,

possède des limitations très fortes en terme de capacités de traitement et d'une mémoire à long terme qui permet le stockage d'une grande quantité de schémas durables dans le temps mais qui est soumise à des principes de stockage et de récupération qui demandent du temps d'étude, de la profondeur de traitement et des indices de récupération. Pour améliorer les apprentissages, deux courants distincts mais non exclusifs suggèrent des stratégies de présentation des supports d'enseignement. La théorie de la charge cognitive qui est centrée sur la gestion des ressources disponibles en mémoire de travail pour préserver les moyens de construire des schémas et la théorie des *Desirable Difficulties* qui est fondée sur l'idée d'introduire des difficultés pertinentes dans les supports d'enseignement pour générer de la profondeur de traitement et ainsi favoriser les apprentissages implicites, moins coûteux pour le système cognitif. Dans le cadre de l'*Instructional Design*, cette thèse s'intéresse plus particulièrement à la théorie de la charge cognitive mais le courant théorique proposé par l'approche *desirable difficulties* permettra de suggérer la validité de certains résultats donnés dans la contribution empirique.

Chapitre 3 :

Apprentissage de connaissances secondaires à partir de systèmes complexes

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser aux apprentissages de connaissances secondaires à partir d'environnements complexes et plus particulièrement composés de systèmes techniques pluridisciplinaires (électriques, mécaniques, thermiques, etc.). De nombreux chercheurs (par exemple, Pass, van Merriënboer & van Gog, 2011), insistent sur le fait que les apprentissages les plus performants sont réalisés à partir de supports authentiques des réalités de la vie personnelle ou professionnelle. Cette démarche est recommandée par les institutions dans la majorité des disciplines dispensées à l'école : en technologie (MEN, 2008), en biologie (MEN, 2012), en économie (MEN, 2012), etc. Nous montrerons que les apprentissages à partir d'environnements complexes sont effectivement performants mais ils doivent être intégrés dans des progressions qui prennent en compte les connaissances préalables, la motivation, les capacités du système cognitif des apprenants et la complexité des contenus à apprendre.

Nous allons débiter ce chapitre par une présentation de la définition de systèmes complexes vue par les systémiciens afin de la mettre en relation avec la notion de complexité retenue en psychologie cognitive.

Ensuite, nous examinerons deux types d'activités qui mobilisent l'utilisation de systèmes complexes : l'apprentissage de leur construction et de leur conduite que l'on trouve dans la formation professionnelle et l'apprentissage de lois, de concepts, de règles que l'on trouve en formation technique et scientifique. La présentation de ces deux d'activités nous permettra de bien distinguer l'utilisation de systèmes comme but c'est-à-dire apprendre des

systèmes et l'utilisation de systèmes en tant que moyen, c'est-à-dire apprendre à partir de systèmes.

Puis, nous présenterons plusieurs approches de formation qui ont fait l'objet de travaux de recherches en psychologie cognitive. En effet, les environnements complexes conduisent à des situations difficiles à appréhender car elles demandent un traitement de nombreuses informations, souvent en interaction les unes avec les autres. Pour réduire la complexité, les chercheurs ont proposé des stratégies qui tentent de donner aux apprenants les moyens d'optimiser les performances d'acquisition des connaissances. En particulier, dans les domaines professionnels, les approches les plus rencontrées sont celles qui offrent des progressions qui vont du simple vers le complexe (*Part Task Training*) et des progressions construites directement à partir de la tâche complexe à apprendre (*Whole Task Training*). Dans le même esprit, dans le domaine scolaire, des modèles pédagogiques de référence de types inductif et déductif sont largement utilisés dans les laboratoires d'enseignement pour étudier les systèmes et échafauder les apprentissages.

Ensuite, nous nous intéresserons à l'effet des connaissances préalables sur les apprentissages en termes d'activation mais aussi de pertinence en passant en revue les situations les plus rencontrées en enseignement. En particulier, nous examinerons le cas des apprentissages à partir de connaissances naïves, les cas où les connaissances préalables ne sont pas en adéquation avec la suite des apprentissages prévus et enfin la construction de l'expertise.

Enfin, selon la complexité de la situation, la mémoire de travail risque d'être en dépassement de capacité de traitement et dégrader fortement la performance de l'apprentissage. La théorie de la charge cognitive sera alors présentée comme un cadre explicatif en faveur d'une approche psycho-ergonomique pour faciliter les apprentissages complexes et en introduction à l'*Instructional Design*.

1- Qu'est ce qu'un système complexe ?

1-1 Approche générale

Plusieurs auteurs ont proposé une définition des systèmes complexes. Par exemple, pour De Rosnay (1975), un système est un ensemble d'éléments constituant une entité, une unité globale avec une limite. Pour von Bertalanffy (1968), un système est un ensemble de parties, un ensemble d'unités en interrelations mutuelles. Pour de Saussure (1931), c'est une totalité organisée avec des niveaux hiérarchisés. Nous retrouvons dans toutes ces définitions l'idée

d'une totalité constituée d'éléments en interaction. Pour les systémiciens, d'une façon générale, un système complexe se définit par les propriétés suivantes :

- Il est composé d'un grand nombre d'éléments ;
- les éléments sont de plusieurs natures et possèdent une structure interne qui ne peut pas être négligée ;
- les éléments sont interdépendants ;
- la connaissance des propriétés des éléments isolés n'est pas suffisante pour connaître le comportement global du système.

Un organisme vivant ou encore un plat de spaghetti sont des systèmes complexes car les observations préalables ne permettent pas de prévoir les conséquences d'une sollicitation sur un de ses éléments ou sur sa globalité. La réponse du système ne sera pas déterministe mais stochastique, elle sera donc approchée par des calculs de probabilité. Pour les systèmes complexes, le comportement des structures constitutives a des conséquences sur le comportement de l'ensemble à travers des interactions locales (Jacobson & Wilensky, 2006; Wilensky & Reisman, 2006). Dans le contexte de la formation autour des sciences et des techniques, la compréhension des systèmes constitue une approche privilégiée mais elle pose des difficultés importantes aux apprenants. Comme l'ont montré Grotzer et Subbury (2000) dans le domaine de l'électricité ou encore Hmelo et al. (2004) dans le domaine de la respiration humaine, lorsque l'apprentissage est construit à partir de l'étude de systèmes pris dans leur globalité, un traitement cognitif pouvant être très coûteux mais dépendant de l'expertise de l'apprenant est mis en jeu. En effet, les apprentissages à partir de ces supports doivent être considérés comme complexes car la compréhension de l'ensemble peut être entravée par la capacité limitée de traitement du système cognitif du fait de la grande quantité d'informations liée à la description des parties constitutives, des interactions entre les différentes parties et du traitement de l'ensemble. Hmelo-Silver et Pfeffer (2004) soutiennent que les caractéristiques des systèmes complexes les rendent difficiles à comprendre car ils sont composés de plusieurs niveaux d'organisation qui dépendent des interactions locales, les causes et les effets n'étant pas liés de façon claire et univoque. Ces interactions sont souvent dynamiques et invisibles ce qui les rendent très difficiles à identifier pour les apprenants et représentent une difficulté pour la conduite des enseignements (Feltovich et al., 2001; Hmelo-Silver et al., 2007). Dans ce sens, certains chercheurs soutiennent que la modélisation ne contribue pas beaucoup à comprendre la complexité, car elle augmente la charge cognitive lors des apprentissages (Gobert, 2003). Enfin, dans une note de synthèse sur le management

de la pensée systémique Thietard (2000) estime qu'un système complexe est difficilement décomposable. Focaliser son attention sur une partie du système masque ses aspects essentiels, son comportement global et sa structure. Dans une perspective d'apprentissage à partir de supports authentiques des réalités de la vie personnelle et professionnelle, l'approche systémique et globalisante trouve un intérêt tout particulier mais nécessite des aménagements pour permettre aux apprenants de bénéficier de la progression nécessaire à la réussite de leurs apprentissages.

1-2 Systèmes complexes – systèmes compliqués

Le niveau de complexité d'un système n'est pas simplement fonction du nombre de ses composants mais il est aussi lié au nombre d'interactions présentes et à leur degré de non linéarité. Un premier niveau de non linéarité peut être décrit par des équations polynomiales, un haut niveau peut être modélisé par des relations faisant apparaître des variables discontinues. Dans un souci de catégorisation, les systémiciens différencient les systèmes complexes des systèmes compliqués. Dans son lexique de systémique et de prospective, Lugan (2006) donne, pages 82 et 83, les deux définitions suivantes :

« Un *système compliqué* est un système en théorie totalement prévisible, donc entièrement programmable. Par exemple, les systèmes mécaniques, électriques, électroniques, chimiques, thermiques, balistiques, etc... sont des systèmes compliqués. En d'autres termes, la possibilité de contrôler les variables permet de déterminer l'état futur souhaité du système compliqué.

« La *complexité* c'est l'incertitude au sein de systèmes richement organisés, faits de mélange entre de l'ordre et du désordre. Dans une perspective systémique, c'est d'abord un phénomène quantitatif, c'est-à-dire la quantité d'interactions et d'interférences entre un grand nombre d'éléments, ou d'unités actives. Ces quantités d'interaction défiant les possibilités de calcul. »

Par exemple, le système technique « automobile » est considéré comme un système compliqué car malgré le nombre de pièces qui le compose, les commandes présentes au poste de conduite induisent des actions qui ne sont heureusement pas aléatoires. La prévision météorologique à long terme reste pratiquement impossible à réaliser car le système étant chaotique, il est très sensible aux conditions initiales. Dans le même ordre d'idée, à un niveau de complexité moindre, nous trouvons la prédiction du climat, qui lui, obéit à des paramètres beaucoup plus stables, calculables, et qui correspond à des lois physiques connues et vérifiées depuis longtemps.

1-3 La mesure de la complexité des systèmes

Il ne semble pas pour l'instant y avoir d'unité de mesure de la complexité d'un système. Il existe simplement de nombreuses méthodes pour caractériser la simplicité ou la complexité des systèmes. En voici quelques-unes :

- Les systèmes qui ont beaucoup de composants peuvent être considérés comme complexes en comparaison des systèmes qui en ont peu. Ainsi la cardinalité d'un ensemble peut être prise comme une mesure de sa complexité.
- Les systèmes dans lesquels il y a beaucoup d'interdépendances entre les composants sont généralement considérés comme plus complexes que les systèmes avec moins d'interdépendance entre les composants.
- Les systèmes dont le comportement est considéré comme « imprévisible » peuvent être considérés comme complexes comparés à ceux dont le comportement est prévisible.
- La complexité des systèmes peut être mesurée par leur contenu d'information, au sens de Shannon-Wiener. Par ce critère, les systèmes ayant beaucoup de composants identiques sont moins complexes que les systèmes de taille comparable dont les composants sont tous différents.

Il est possible de généraliser la mesure de la complexité des systèmes à la complexité des théories ou des problèmes. Ainsi, en relation étroite avec la notion de complexité informationnelle, nous trouvons l'idée de mesure de la complexité des théories ou des problèmes par le nombre de leurs paramètres, ou par le nombre de symboles nécessaires pour les caractériser.

1-4 La complexité dans le champ de la psychologie cognitive

Sweller (1994) suggère que la mesure de la complexité de tout dispositif d'information peut être placée sur un continuum (fig 7) en fonction de la façon dont les éléments e_1 , e_2 , e_n qui le constituent interagissent.

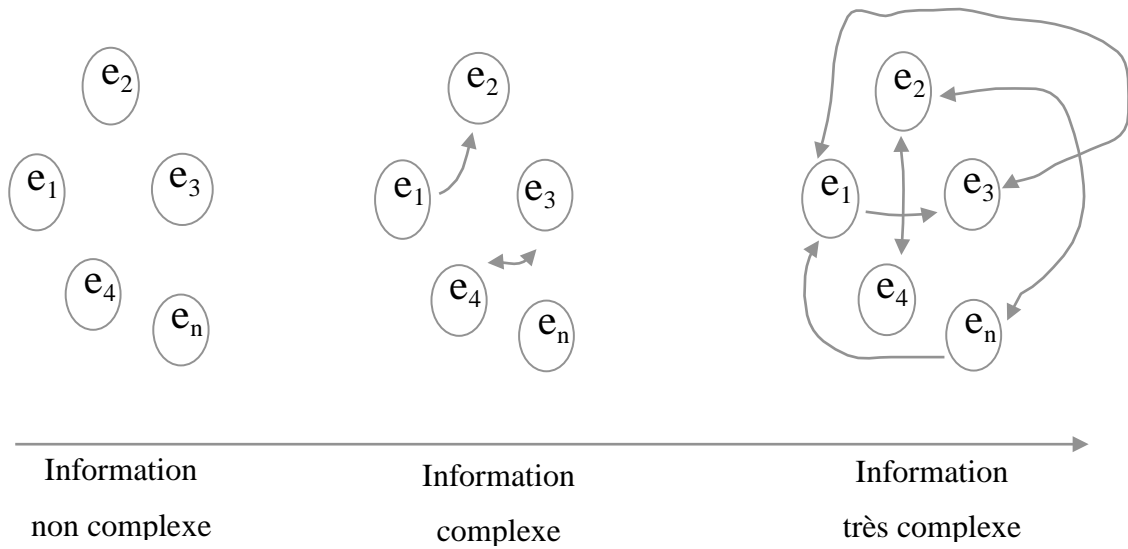


fig 7 : La complexité de l'information placée sur un continuum

D'un côté, les éléments du système d'information sont indépendants et ils interagissent donc peu ou pas du tout (par exemple dans le domaine de la mécanique, les coordonnées des points dans un repère cartésien). Dans cette configuration, l'apprentissage n'impose pas une charge cognitive importante car les éléments peuvent être appris séquentiellement et indépendamment les uns des autres et le concept de compréhension n'est pas approprié dans ce cas. De l'autre côté, les éléments interagissent fortement comme par exemple dans le cas de la place des mots dans une phrase ou encore dans les équations mathématiques de récurrence. Par exemple, au pas de calcul n , U_n est donné par une relation du type :

$$U_n = a.U_{n-1} + b.U_{n-2} + c.U_{n-3}$$

La valeur de l'échantillon U_n dépend de la valeur de l'échantillon U_{n-1} , de celle de U_{n-2} et de celle de U_{n-3} . Au pas de calcul suivant, U_{n-1} prend la valeur de U_n , U_{n-2} prend la valeur de U_{n-1} et ainsi de suite. Nous avons aussi des exemples (fig 8) en automatique où la sortie à un instant $t + dt$ dépend de la consigne et de l'état de la sortie à l'instant t . Dans cette configuration, la compréhension nécessite un traitement simultané de l'ensemble des éléments en interaction ce qui impose une lourde charge cognitive.

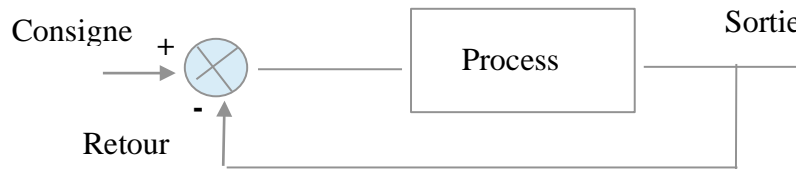


fig 8 : Système automatique

Pollock, Chandler et Sweller (2002) ont mis en évidence la notion d'informations complexes et l'influence de leur niveau de complexité dans le cadre des apprentissages. Pour tester leurs hypothèses, ces auteurs ont mis en concurrence, sur 4 expériences, 2 types de présentation des informations : éléments en interaction pris de façon isolée vs éléments en totale interaction. Les résultats montrent que les apprentissages sont plus performants quand les apprenants sont placés dans la situation de formation à partir des éléments isolés. Les résultats ont été validés avec des apprentissages procéduraux et des apprentissages déclaratifs. Cependant, les travaux de Pollock, Chandler et Sweller (2002) appellent deux remarques :

- entre les 2 modalités de présentation, la quantité d'information présentée n'est pas équivalente ;
- l'isolement d'informations résulte de choix très subjectifs et il est difficile de discerner ce qui est élémentaire de ce qui est simple.

Une réplique de ces expériences en maintenant constante la quantité d'information présentée, en contrôlant la nature des interactions est à la base du travail de recherche présenté dans cette thèse.

1-4 Implications pour l'enseignement dans les domaines techniques et scientifiques à l'école

Développer des séquences d'apprentissages performantes dans les sciences et les techniques supposent de créer des environnements complexes authentiques des réalités de la vie courante ou professionnelle (van Merriënboer, 2007) pour conduire à des apprentissages efficaces perçus comme des activités fonctionnelles (Bourgois & Chapelle, 2007). Dans le cadre des apprentissages techniques et scientifiques, ces environnements sont constitués de supports matériels qui peuvent être présentés sous leur forme réelle mais aussi sous la forme d'un modèle analytique (fonctions de transfert) exploité à partir de simulateurs. Ces supports matériels sont souvent associés à des documents qui ont pour but d'assurer la présentation

générale, la description du système et de ses constituants, les règles d'interaction entre les éléments et le guidage des activités. Dans les études menées en psychologie cognitive, les systèmes complexes sont en fait des systèmes compliqués. Pour comprendre leur fonctionnement, il est nécessaire d'étudier les propriétés de chacun des éléments qui les constitue ainsi que celles des interactions qui les relient. La compréhension de ces systèmes compliqués nécessite du temps et des moyens de formation et devient possible par l'acquisition de l'expertise.

2- De quelles manières aborde-t-on l'ingénierie des systèmes techniques en enseignement ?

2-1 Les prémisses de la notion de système technique

A partir d'une note de Decomps (2001) nous pouvons lire que c'est au XVIIIème siècle qu'apparaît la technologie dans sa conception moderne, chez les encyclopédistes, où l'on se borne le plus souvent à nommer les techniques en s'efforçant de dégager un langage universel. Dans le champ de la conception des machines, il faudra attendre près d'un siècle pour tisser des liens avec la science où notamment Frantz Reuleaux (vers 1880) se fonde sur la cinématique pour élaborer une méthode de conception des machines mécaniques par agencement de structures élémentaires. Une évolution majeure se dessine au milieu du XXe siècle avec trois contributions françaises respectivement dues à Lucien Géminard, à Gilbert Simondon puis à l'école d'André Leroi-Gourhan. Il s'agit là de trois points de vue différents mais complémentaires :

- *une approche structurale* : développée par Lucien Géminard, dans le courant de Frantz Reuleaux, elle se situe dans la perspective des concepteurs de machines. Chaque architecture de machine repose sur l'assemblage de briques élémentaires. A partir de l'observation et de la comparaison de l'ensemble des machines, des invariants sont repérés et deviennent des éléments déterminants pour construire de nouvelles machines ;
- *une approche génétique* : elle est portée par Gilbert Simondon et plus récemment formalisée par Yves Déforges (1985). Cette approche privilégie l'étude de l'évolution des machines au cours du temps en intégrant la dimension culturelle. Cette approche permet de donner des pistes pour l'innovation ;
- *une approche générale* : introduite par Leroi-Gourhan et Haudricourt, elle est basée sur la prise en compte des contraintes économiques, sociales et culturelles qui

s'attachent à l'objet technique. En particulier, les choix et les décisions technologiques ont un impact fort sur la société : elle doivent respecter les lois de la nature tout en respectant aussi des lois économiques et sociales. On pourrait prendre de nombreux exemples dans les problématiques actuelles liées à l'environnement.

Chacune de ces approches nous révèle que les sciences et les technologies sont des disciplines qui mobilisent l'intégration de nombreuses composantes reliées entre elles de façon plus ou moins facile à traiter. Il est intéressant de noter que l'approche structurale qui cherche à dégager des invariants de structure va bien dans le sens de l'apprentissage par repérage de traces stables de l'environnement et de la construction de l'expertise.

2-2 Approche analytique et approche systémique

Selon l'Association Française d'Ingénierie Système (AFIS), « l'Ingénierie Système (IS) est une démarche méthodologique qui englobe l'ensemble des activités adéquates pour concevoir, faire évoluer et vérifier un système apportant une solution économique et performante aux besoins d'un client ». Dans cet esprit, l'IS s'appuie en particulier sur un processus collaboratif et interdisciplinaire de résolution de problèmes basé sur des connaissances issues des sciences et des technologies, la mise en œuvre d'un ensemble organisé de matériel, de logiciel, de compétences humaines et de processus en interaction. Pour former les ingénieurs à maîtriser cette complexité, deux approches sont principalement enseignées : l'approche systémique d'un côté et l'approche fonctionnelle, structurale et comportementale d'un autre côté.

La formation à l'ingénierie des systèmes complexes nécessite des approches et des méthodes particulières pour permettre aux élèves de faciliter leurs apprentissages. Du point de vue des théoriciens des systèmes complexes comme De Rosnay (1975), deux approches sont évoquées : l'approche analytique et l'approche systémique. L'approche analytique permet d'aborder les systèmes en isolant les uns après les autres les éléments qui les composent, en comprenant les interactions des éléments entre eux pour prédire les propriétés du système dans sa globalité. Chaque élément du système devient un objet d'étude plus petit et plus facile à appréhender. Cependant, l'approche analytique ne conduit pas systématiquement au succès lorsque le système étudié est très complexe car cette approche trouve ses limites dans la difficulté de reconstruction d'un modèle général du fait de la présence de très nombreux éléments à manipuler, d'interactions difficiles à identifier et de la difficulté voire l'impossibilité d'appliquer les principes de superposition linéaire. Contrairement à l'approche analytique, l'approche systémique considère le système dans sa totalité organisée, dans sa complexité et dans sa dynamique en privilégiant l'étude des interactions entre les éléments

constitutifs. Elle permet de dégager des invariants sous la forme de principes généraux, structuraux et fonctionnels pouvant s'appliquer à tous les systèmes. L'approche systémique est particulièrement adaptée aux systèmes complexes qui se distinguent des systèmes compliqués par leur comportement difficilement prévisible.

2-3 Approche fonctionnelle, structurelle et comportementale

L'approche fonctionnelle, structurelle et comportementale permet aux apprenants d'aborder l'analyse et la conception des systèmes complexes en s'appuyant sur une démarche d'analyse multi-niveaux. Cette démarche, expérimentée par Goel et al. (2009) dans le domaine des écosystèmes, se décompose en trois niveaux. Le niveau fonctionnel qui permet d'identifier la fonction du système ainsi que les contraintes associées (par exemple, dans le domaine des systèmes techniques ce sont les contraintes de configuration, de réglage, d'alimentation en énergie et d'exploitation). Le niveau structurel qui permet de décrire l'architecture et les solutions constructives faisant apparaître les diverses relations entre les sous-structures. Le niveau comportemental qui s'intéresse au fonctionnement réel du système et à la vérification des performances attendues avec les contraintes imposées. Cette approche est une modalité de formation très utilisée dans les sciences de l'ingénieur pour construire des séquences sur l'analyse et la conception de systèmes techniques industriels.

3- Les stratégies pédagogiques pour enseigner à partir de systèmes complexes

L'étude des systèmes complexes constitue un moyen parmi d'autres pour créer des environnements d'apprentissage. Les systèmes doivent être considérés comme des supports permettant de présenter aux apprenants des phénomènes, des situations ou encore des organisations concrètes issues du monde dans lequel ils vivent. Le rôle des enseignants est alors de concevoir des séquences de formation utiles (qui répondent aux exigences des programmes), utilisables (qui peuvent être implantées dans l'environnement de la formation) et accessibles (qui sont en adéquation avec les connaissances préalables des élèves et qui les motivent). Les systèmes peuvent être des supports d'étude inclus dans des approches par centres d'intérêt (Musial & Tricot, 2008a). Dans ce cas, les mêmes savoirs et les mêmes compétences sont mobilisés sur des systèmes différents mais représentatifs d'un même champ conceptuel. Par exemple, pour étudier le transport de l'information, le concepteur de la séquence pédagogique peut s'appuyer sur les réseaux informatiques filaires, les réseaux informatiques sans fils et les liaisons analogiques. Pour un objectif prédéfini et selon la difficulté des apprentissages abordés, différentes démarches pédagogiques sont envisageables

et en particulier, la démarche inductive, la démarche déductive ou encore un mélange des deux démarches.

3-1 La démarche générale pour le développement d'une séquence pédagogique

En pratique, la mise au point des séquences pédagogiques s'appuie sur la structuration des contenus d'enseignement afin d'en faciliter l'apprentissage pour atteindre les objectifs pédagogiques prédéfinis. Pour cela, trois étapes sont nécessaires :

- l'identification du but et des objectifs spécifiques de l'enseignement (prescrits par les programmes et les référentiels de formation) ;
- la structuration des contenus et la mise au point d'un guidage approprié (donnés à titre indicatif par des documents d'accompagnement des programmes et des référentiels en termes de repères méthodologiques) ;
- la conception des séquences d'enseignement (c'est-à-dire une tâche ou plusieurs, des supports, un discours, un dispositif de régulation et d'évaluation).

L'application des programmes est imposée par le législateur. La structuration des contenus renvoie à des notions de didactique des disciplines. La conception des séquences de formation est sous le contrôle de l'enseignant. Il prend la responsabilité du choix de la démarche pédagogique, crée son environnement matériel de formation, décide du niveau de guidage apporté aux apprenants durant le déroulement de la séquence de formation. Ce guidage se situe au niveau des documents remis aux élèves mais aussi au niveau de l'accompagnement individuel. Dans le contexte scolaire, deux démarches sont principalement adoptées : la démarche déductive et la démarche inductive. Chacune d'entre-elle offre des avantages et des inconvénients, une démarche mixte permet de tirer le meilleur parti des deux stratégies (Musial & Tricot, 2008a, 2008b ; Georgiou, 2008).

3-2 La pédagogie déductive

Chez les anglo-saxons, cette démarche est appelée *direct instruction*, elle est opposée à la pédagogie de la découverte (*discovery learning*) et à la démarche inductive. Dans la démarche déductive, l'enseignant pose *a priori* l'hypothèse d'une relation entre différentes variables, et l'applique ensuite à l'étude d'un certain nombre d'observations. La démarche déductive fait donc appel à un raisonnement qui va du général au particulier. Cette démarche peut s'appliquer à l'apprentissage d'une règle, d'un principe général, d'un théorème, d'un concept, d'une classification ou encore à une méthode de résolution. La démarche déductive donne un accès plus rapide aux connaissances mais dans leur mise en application, elle n'offre pas la

meilleure garantie de résultats. En effet, le choix des cas particuliers nécessaires à la production d'exercices reste une réelle difficulté dans la mesure où ils doivent être conformes au modèle enseigné c'est-à-dire réduit, par exemple, à la stricte application d'une formule. De plus, la pédagogie déductive mobilise un processus de particularisation de connaissances générales qui peut conduire parfois à manipuler les cas particuliers dans le but de les faire coïncider avec la connaissance générale qu'on leur applique (Musial & Tricot, 2008a), ceci en écartant les caractéristiques particulières qui viendraient mettre en défaut la connaissance générale qui est mobilisée. En termes d'efficacité, Klahr et Nigam (2004) soulignent que cette méthode d'enseignement montre de bonnes performances dans l'apprentissage de procédures qui sont très difficiles à découvrir par soi-même (par exemple : mode d'emploi de matériel, langages de programmation). En revanche, selon Georgiou (2008), dans la voie scolaire, la pédagogie déductive est principalement caractérisée par son manque de liaison avec les expériences personnelles des apprenants et par le fait qu'elle conduise à ne les préparer qu'à de futures possibles activités.

3-3 La pédagogie inductive

La pédagogie inductive s'appuie sur une stratégie pédagogique fondée sur un passage du particulier au général. Peirce (1974) distingue deux formes d'induction : l'induction classique et l'induction statistique. L'induction classique, aussi appelée induction par énumération, est l'idée selon laquelle ce qui est vrai pour un cas particulier est généralisable à l'ensemble de situations présentant les mêmes caractéristiques. La seconde forme, l'induction statistique, consiste en la généralisation des proportions déjà observées aux mêmes proportions pour les cas à venir. Michalski (1991) ajoute à cette taxonomie la spécialisation inductive qui fait appel à des connaissances qui permettent d'affiner les données et restreindre le champ des possibles. Ainsi, l'induction est généralisante ou spécialisante, c'est-à-dire qu'elle procède du particulier au général, ou du particulier au particulier. D'un point de vue plus large, le raisonnement inductif consiste à prendre comme point de départ des faits particuliers associés entre eux et à tirer de ces associations une proposition générale énonçant la probabilité que de telles associations se manifestent en d'autres occasions (Fortin, 1996).

La démarche inductive est un terme générique qui englobe un éventail de moyens comme l'apprentissage par la démarche d'investigation, l'apprentissage par la résolution de problèmes, l'apprentissage par la conduite de projet ou encore l'apprentissage par la découverte (Prince & Felder, 2006, 2007). Toutes ces méthodes reposent sur une forte implication de la part des apprenants dans la construction de leurs connaissances. Ces

méthodes trouvent leur terrain d'application dans les théories pédagogiques constructivistes (apprentissage actif) et socio-constructivistes (apprentissage collaboratif).

La démarche inductive part d'observations sur des cas particuliers et mène à une hypothèse ou un modèle scientifique. Le vocabulaire anglo-saxon utilise le terme de démarche constructiviste ou de pédagogie de la découverte. Au travers d'exploration et de résolution de problèmes, les élèves jouent un rôle actif dans la création, dans l'intégration et dans la généralisation des connaissances. Sur le principe de « j'ai fait ... je retiens », cette démarche donne du sens à la situation de formation, favorise le sentiment de compétence des apprenants et leur permet d'avoir un contrôle sur le déroulement de l'activité. Bicknell-Holmes et Hoffman (2000) soutiennent que la pédagogie inductive permet aux élèves d'apprendre à leur rythme, qu'elle contribue à la motivation des élèves, qu'elle donne de la flexibilité dans le déroulement des apprentissages et qu'elle favorise la perception d'être maître de ses progrès. Ce type de démarche, qui nécessite une profondeur de traitement importante de la part de l'apprenant, aide donc à développer des stratégies cognitives et contribue fortement aux apprentissages métacognitifs et favorise la création de schémas. De plus, ses apports ne se limitent pas au cadre scolaire mais s'étendent à celui de la vie courante. En pratique, la mise en œuvre de la démarche se déroule en trois phases :

- la contextualisation, c'est-à-dire le repérage des éléments caractéristiques de la situation et leur mise en relation. Cette première phase permet d'impliquer les apprenants et de mobiliser les connaissances préalables pour construire les nouvelles connaissances (Bicknell-Holmes & Hoffman, 2000) ;
- la décontextualisation : à partir de plusieurs observations y compris dans des contextes différents, l'apprenant recherche des invariants de comportement, des invariants de structure et produit des hypothèses en terme de généralisation. Cette phase contribue à la production de changements conceptuels ;
- la recontextualisation en confrontant les apprenants à des situations proches de celles qui leur ont permis l'apprentissage (mobilisation de la compréhension) ou à des situations plus éloignées qui leur donneront l'opportunité de transférer leurs acquis.

Pour développer une séquence de formation qui s'appuie sur une démarche inductive, il est essentiel de respecter trois conditions (Mouchot, 2003, p. 27) :

- le nombre d'observations doit être relativement important ;
- les observations doivent être réalisées dans différentes conditions ;

- aucune observation ne doit apporter de contradiction avec les autres observations.

Bien que la démarche inductive soit assez largement considérée comme performante, elle soulève quelques limites théoriques et pratiques. Selon Prince et Felder (2006), la comparaison rigoureuse des méthodes inductives par rapport aux méthodes déductives n'est pas aisée car il existe de nombreux types d'approches inductives, chacune pouvant être mise en œuvre de plusieurs façons (par exemple une première difficulté serait de contrôler le niveau d'accompagnement des élèves par l'enseignant où encore son degré d'expérience). Dans leur étude, ces auteurs passent en revue différentes méthodes utilisées en pédagogie inductive comme par exemple l'apprentissage par résolution de problèmes, l'apprentissage par l'étude de cas ou encore par la découverte. Pour chaque méthode, ils donnent une description de la démarche et son champ d'application. Compte tenu de la difficulté (voire l'impossibilité) d'effectuer une étude comparative, ils ont procédé à l'analyse des résultats de plusieurs études réalisées avec des enseignants différents, des populations différentes d'étudiants puis ont cherché à établir une méta-analyse. Il en ressort par exemple que les études de cas ont un franc succès chez les enseignants mais il n'y a pas de validations empiriques qui soutiennent de façon solide cette méthode. En ce qui concerne la pédagogie de la découverte, pour certains auteurs cette méthode peut améliorer l'apprentissage, d'autres arrivent à une conclusion opposée mais l'ensemble des études montrent quand même un effet positif de l'apprentissage par la découverte si la tâche d'apprentissage est basée sur des principes déjà compris. Nous constatons ici qu'il ne semble pas facile de valider empiriquement la pédagogie inductive dans sa globalité car elle s'appuie sur de très nombreuses méthodes de conception pédagogique, chacune d'entre elles étant déjà difficile à évaluer, comme le montrent les résultats souvent contradictoires.

Selon Musial et Tricot (2008b), dans le cas d'une démarche inductive, la difficulté réside dans le fait de discerner, au cours de la conduite de la séquence d'apprentissage, la « proposition de l'élève » pertinente c'est-à-dire celle qui va permettre d'avancer vers la connaissance. Par ailleurs, l'observation d'un fait présuppose une théorie et c'est cette théorie qui guide l'observation. Il n'est donc pas certain que les apprenants observent ce que l'enseignant a prévu lors du développement de sa séquence de formation. Sur un plan plus pratique, dans certains cas (par exemple en formation professionnelle dans l'industrie), l'environnement d'apprentissage peut être difficile à réaliser pour des questions matérielles et financières. De plus, il est à noter que la multiplicité des observations implique du temps et parfois cette démarche peut s'avérer incompatible avec les durées allouées.

3-4 Le modèle de la « boucle de base »

La démarche déductive et la démarche inductive sont deux approches qui ne doivent pas être systématisées, elles sont complémentaires. Prince et Felder (2006) insistent sur le fait que l'apprentissage se fait inévitablement dans les deux sens, Les apprenants utilisent leurs observations pour construire des règles et des théories (induction) et ensuite testent ces théories dans des applications qui peuvent être vérifiées expérimentalement (déduction). L'induction précède très souvent la déduction. Dans ce sens, Musial et Tricot (2008b) proposent un modèle du processus d'enseigner qui s'appuie sur « la boucle de base » (fig 9).

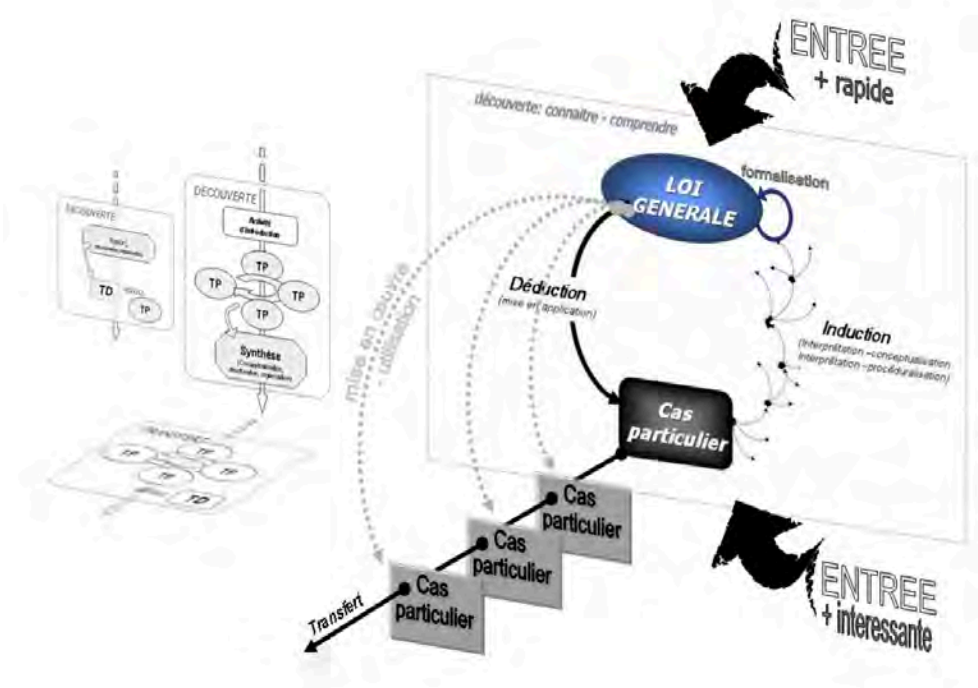


Figure 9 : La boucle de base d'après Musial et Tricot (2008b)

Deux critères pédagogiques importants favorisent la pertinence du choix d'une entrée dans la boucle de base : les niveaux de complexité et de criticité des savoirs abordés (Aublin & Taraud, 2005). La complexité est conditionnée par le niveau d'interaction du savoir visé avec d'autres savoirs. Plus un concept est délicat à comprendre, plus il faut s'efforcer de lui associer une démarche d'apprentissage inductive et pratique, qui permettra aux étudiants d'y rattacher des représentations mentales justes et au professeur de bâtir une formation s'appuyant sur une solide progressivité des acquis. La criticité exprime le caractère fondamental d'un concept qui, s'il n'est pas bien assimilé, entraînera des difficultés

d'apprentissages ultérieures importantes, même si son niveau de complexité n'est pas très élevé.

3-6 Implications dans le contexte de cette thèse

Nous avons présenté ici des démarches pédagogiques qui vont du particulier vers le général (pédagogie inductive), du général vers le particulier (pédagogie déductive) puis un mélange des deux. La pédagogie inductive permet une construction des connaissances plus intéressante par l'étude de nombreux cas particuliers alors que la pédagogie déductive permet la construction de connaissance de façon plus rapide. Ces deux démarches sont donc d'un grand intérêt pour l'étude de systèmes complexes mais elles n'excluent pas de s'intéresser aux conditions de traitement de l'information au cours de la phase d'apprentissage, c'est-à-dire à la sollicitation du système cognitif de l'apprenant à chaque instant. Cette thèse est consacrée à cet aspect psycho-ergonomique. Dans cette idée, une présentation en deux étapes des informations peut-être envisageable dans une approche inductive comme dans une approche déductive.

Après avoir choisi la méthode pédagogique (déductive, inductive ou bien les deux) pour construire son environnement d'apprentissage, le concepteur doit évaluer si les informations présentées pourront être traitées simultanément par les apprenants au moment de l'activité. Si ce n'est pas le cas, la complexité de l'environnement pourra être temporairement fractionnée en proposant une approche consistant à extraire des parties de l'ensemble (le tout). Par exemple, dans le cas de la pédagogie déductive, bien que la démarche parte du général pour aller vers le particulier, la présentation d'une théorie complexe pourra être faite en posant des hypothèses conduisant à diminuer le nombre des variables à manipuler. Prenons à nouveau l'exemple de la loi d'Avogadro, qui décrit le comportement des gaz parfaits à basse pression où R est une constante :

$$P.V = n.R.T$$

le fait d'émettre dans un premier temps l'hypothèse que la température reste constante permet de poser une relation plus simple (la loi de Boyle-Mariotte) :

$$P.V = k_1$$

ou bien d'émettre l'hypothèse que la pression reste constante (loi de Gay-Lussac qui dit qu'à

pression constante, le volume est directement proportionnel à la température) :

$$V = k_2.T$$

La relation de départ représente le « tout », c'est-à-dire l'ensemble des informations avec toutes les interactions. Les hypothèses permettent d'appliquer la relation avec une approche des « parties » vers le « tout ».

Il est important de souligner que l'approche « parties vers tout » ou « tout vers parties » n'est pas à comparer avec les démarches inductives et déductives. Le fractionnement de la complexité est simplement un moyen de réduire temporairement la quantité et les interactions des informations au moment de leur traitement par le système cognitif de l'apprenant.

4- Les effets des connaissances préalables lors des apprentissages complexes

Pour construire une séquence d'apprentissage, il est nécessaire de connaître le niveau de connaissances préalables des apprenants. Dans les premiers apprentissages, ils n'ont par définition aucune connaissance dans le domaine d'étude. Dans ce cas, pour commencer à traiter le sujet qu'il leur est proposé, ils s'appuient sur leurs connaissances personnelles qui prennent alors le statut de présupposés et s'avèrent très souvent inexacts ou non appropriées au contexte. Cette situation d'apprentissage conduit à des changements conceptuels qui prennent leur source d'explication dans le champ des théories naïves. Dans le cas d'une progression pédagogique, les apports des nouvelles connaissances se font sur la base de connaissances préalablement intégrées par les apprenants mais pour espérer une performance intéressante, l'enseignant doit s'assurer de la disponibilité et de l'accessibilité de ces connaissances pour faciliter la liaison avec ce qui doit être appris.

4- 1 Apprentissages complexes et mise en relation avec les connaissances naïves

van Merrienboer et Kirschner (2007), cités par Frick, Chadha, Watson et Zlatkovska (2010) définissent les apprentissages complexes comme des processus qui visent à l'intégration de connaissances, de compétences, d'habiletés et d'attitudes nécessaires à l'exécution de tâches avec un niveau de performance élevé. De plus, les apprentissages complexes doivent conduire à la coordination de différentes compétences et au transfert de ce qui est appris à l'école ou en formation dans les domaines de la vie quotidienne et professionnelle. van Merrienboer et al. (2007) ainsi que Merrill (2002) soulignent que les apprentissages sont plus profitables quand les supports pédagogiques sont réalisés sur la base de tâches authentiques, de la vie réelle.

Dans le même sens, Vosniadou (2007) constate que les chercheurs du domaine insistent depuis plus de 20 ans sur la nécessité de donner du sens à la situation, d'impliquer les élèves, notamment à travers de situations authentiques et sociales (Brown, Collins & Duguid, 1989). Cette hypothèse est sous-tendue par les théories sur les connaissances naïves¹ qui, selon Lautrey (2008), sont des croyances ou des connaissances acquises par les enfants à partir de leurs propres expériences dans les situations de la vie courante. Chez les individus, les connaissances naïves sont structurées en systèmes cohérents, qui jouent dans le changement conceptuel un rôle analogue à celui que jouent les théories dans le développement des connaissances scientifiques (Gopnik & Wellman, 1994). Ces connaissances naïves n'ont pas le niveau de complexité, d'abstraction et d'explicitation des théories scientifiques, mais elles sont supposées permettre de fournir des explications causales, d'engendrer des prédictions, et de pouvoir être modifiées lorsque les faits ne confirment pas les prédictions. Ces dernières propriétés sont à la base des stratégies pédagogiques par lesquelles les apprenants vont pouvoir découvrir et exploiter des phénomènes complexes nouveaux afin d'améliorer leurs interprétations conceptuelles et ainsi élargir le domaine de la validité de leurs connaissances.

4-2 Structuration des connaissances et changement conceptuel dans les domaines scientifiques et techniques

Le modèle de Posner, Strike, Hewson et Gertzog (1982) est un des premiers modèles de changement conceptuel. Ce modèle fait référence au jugement conscient de l'élève lors de l'apprentissage. Selon les auteurs, en s'appuyant sur les travaux de Piaget, le changement conceptuel correspond à un remplacement des conceptions et à une accommodation. Pour Vosniadou (1994), les connaissances naïves sont cohérentes et organisées en théories cadres et spécifiques. Les théories cadres correspondent à des présuppositions ontologiques et épistémologiques alors que les théories spécifiques sont construites à partir des croyances et de l'interprétation des observations. Le changement conceptuel correspond alors à une révision qui s'opère au niveau des théories cadres et spécifiques pour créer les nouvelles représentations. Contrairement au modèle de Vosniadou (1994), le modèle de changement

¹ Ou connaissances primaires, selon le vocable utilisé par Geary (2008). Il est à noter que si Geary considère que les connaissances primaires et les connaissances naïves sont la même chose, il confère aux connaissances primaires une autre caractéristique : celle d'être présentes dans l'espèce humaine depuis les débuts d'*homo sapiens*. Cette conception est donc contradictoire avec les travaux que nous allons évoquer ci-dessous et qui montrent que les enfants peuvent avoir des connaissances naïves à propos de la technologie, des appareils électriques par exemple.

conceptuel de diSessa (1993) part de l'hypothèse que les connaissances de départ ne sont pas organisées en théories. Les apprenants comprennent le monde avec une collection fragmentée de « pièces de savoir », de relations causales intuitives, de petites structures de connaissance activables dans un ensemble de situations données. Selon diSessa (2006) face à une situation nouvelle, les apprenants possèdent soit une théorie cohérente, soit des idées dispersées sur la situation. Dans ce dernier cas, ils peuvent avoir besoin de temps et de soutien pour intégrer leurs idées en un tout cohérent (Lin, 2006). Par ailleurs, les théories préalablement acquises de façon naïve, peuvent être remises en cause à l'aide de présentations, de résolutions de problèmes ayant pour objectif de modifier les conceptions préalablement établies (Posner, Strike, Hewson & Gertzog, 1982). Cependant, lorsqu'on présente aux apprenants des données incohérentes par rapport à leur théorie initiale, ils peuvent les réinterpréter afin de garder leurs conceptions inchangées (Chinn & Brewer, 1998), ou bien les incorporer à leur théorie naïve (Inagaki & Hatano, 2006). Les connaissances naïves se comportent alors comme des présupposés qui peuvent dans certains cas être à l'origine de difficultés dans la construction des connaissances. Dans ce contexte, il est incontournable pour les enseignants de prendre en compte le niveau d'expertise des apprenants lors de la conception (liaison entre les prérequis supposés pour le niveau de la classe et la complexité du support proposé, complexité et criticité des nouvelles connaissances visées) et du déroulement des séquences pédagogiques (adaptation individuelle des explications). L'adaptation individuelle des explications prend toute son importance car d'un point de vue psychologique, pour l'élève qui doit accepter d'abandonner une partie de ce qu'il croyait jusque-là, le processus de transformation des conceptions est très coûteux et il l'est d'autant plus qu'il lui faut remettre en question les connaissances en lesquelles il a toujours eu confiance.

4-3 Quelques exemples dans les disciplines technologiques et scientifiques

4-3-1 Exemples dans les domaines technologiques

Des recherches ont révélé que les enfants ont des connaissances naïves sur la technologie. Ils croient souvent que la technologie est seulement quelque chose qui est électrique, comme un ordinateur ou une télévision (Jocz & Lachapelle, 2012; Solomonidou & Tassios, 2007). Une étude menée par Lachapelle, Hertel, Jocz et Cunningham (2013) propose d'estimer les conceptions des élèves scolarisés en école élémentaire sur la technologie. L'expérimentation est basée sur trois types de mesures : (1) une question ouverte demandant : « Qu'est-ce que la technologie », (2) une question demandant « la foudre est-elle un type de technologie ?

Pourquoi ou pourquoi pas ? », et (3) une grille de 20 articles illustrés où chaque élève devait indiquer si l'article présente ou non une technologie. Cette étude confirme que les enfants ont tendance à croire fortement que la technologie met en jeu des phénomènes électriques mais ces conceptions varient en fonction des appareils électriques et de la puissance qu'ils évoquent. Cette association est si forte que beaucoup d'enfants ont classé la foudre comme une technologie, même si la grande majorité d'entre eux ont classé correctement tous les autres phénomènes naturels comme n'étant pas de la technologie.

4-3-2 Exemples dans les domaines scientifiques

Dans le domaine de la physique, une expérimentation (Borun, Massey & Lutter, 1994) menée au Franklin Institute Science Museum de Philadelphie portait sur les idées fausses que les visiteurs pouvaient avoir sur la notion de gravité. Dans 51% des cas, les idées fausses font intervenir la rotation de la terre et l'air. Les idées liées aux orbites planétaires et au magnétisme sont également très répandues et on les trouve dans respectivement, 45% et 41% des cas. Pour finir, 10% des individus pensent que la gravité a quelque chose à voir avec le soleil. Dans le champ de l'arithmétique, Lautrey et al. (2008), présentent une connaissance naïve très répandue, y compris chez les adultes : « multiplier, c'est additionner plusieurs fois ». Le champ de validité de cette connaissance permet bien sûr de comprendre un grand nombre de situations mais elle trouve très vite ses limites. Par exemple, pour résoudre le problème suivant : « Un litre d'essence coûte 1,45€. Combien coûte 0,22 litre d'essence ? » Les collégiens échouent parce que multiplier par 0,22 ne se concilie pas avec l'idée d'additionner plusieurs fois. Cette connaissance naïve a d'autres conséquences : l'idée fausse que multiplier rend plus grand. Enfin, dans le domaine de la mécanique, les apprenants ont de grandes difficultés à concevoir que le point de contact entre la roue d'un vélo qui roule et la route possède une vitesse nulle et que si les vélos sans garde-boue projettent de l'eau sur le dos des cyclistes quand il pleut c'est que les gouttes projetées ont une vitesse plus grande que celle du vélo.

4-4 Implication dans le cadre de cette thèse

Pour que les apprentissages soient profitables aux apprenants, il est largement admis par la communauté scientifique que les dispositifs d'enseignement doivent être développés autour de supports ayant un lien avec les réalités de la vie courante et professionnelle. Cette approche conduit à placer les élèves dans des situations qui ne sont pas des artéfacts spécialement construits pour les apprentissages visés. La présentation de situations réelles renvoie à des

conceptions préétablies (connaissances naïves) et engendre donc des changements conceptuels dans les situations d'apprentissages. Par ailleurs, les supports pédagogiques basés sur des réalités de la vie font inévitablement appel à des organisations matérielles pluritechniques et à des concepts scientifiques multidisciplinaires. Dans ce cas, les apprentissages sont caractérisés comme complexes car ils exigent la prise en compte d'environnements très ouverts et impliquent les connaissances préétablies.

5- Les effets des connaissances préalables dans le cas d'une progression pédagogique

A partir de résultats de plusieurs recherches, Ambrose, Bridges, DiPietro, Lovett et Norman (2010) soutiennent que les étudiants apprennent plus facilement quand ils ont déjà des connaissances dans le domaine (Kole & Healy, 2007) et s'ils peuvent lier ce qu'ils sont entrainés d'apprendre à ce qu'ils savent déjà. Cette conception est à rapprocher des thèses soutenues par van Merriënboer concernant les apprentissages à partir d'environnements construits autour de thèmes reliés à la vie courante. Au cours d'une progression pédagogique organisée sur plusieurs séances ou bien réparties sur plusieurs années, les connaissances préalables à la nouvelle phase d'apprentissage ne sont pas toujours disponibles, une activation de ces connaissances est alors nécessaire pour faciliter les nouveaux apprentissages. Par ailleurs, les connaissances préalables peuvent être insuffisantes, manquer de pertinence ou être inappropriées.

D'une façon générale, l'activation des connaissances préalables se fait avec des rappels en début de cours. Pour obtenir des performances d'apprentissage accrues, les connaissances préalables peuvent être activées à l'aide de questionnements pour favoriser leur accessibilité (Woloslyn, Paivio & Pressley, 1994). Par exemple, Peeck, van Den Bosch, et Kruepeling (1982) ou encore Garfield, Del Mas, et Chance (2007) ont constaté que si les étudiants sont invités à donner des exemples où les connaissances acquises dans les cours antérieurs sont mobilisées dans des situations personnelles, les futurs apprentissages sont largement facilités. Les effets des connaissances préalables sur les performances d'apprentissage sont une opportunité à saisir pour développer des séquences pédagogiques fondées sur des systèmes complexes. Mayer, Mathias et Wetzell (2002) ont montré à travers trois expériences ayant pour support un système de freinage pour automobiles et une pompe, les apports positifs d'un séquençement de l'apprentissage en deux étapes. Dans une première étape, ils présentent les différents composants du système à étudier, les nomment et expliquent leur fonctionnement. Dans une deuxième étape, ils montrent le fonctionnement du système complet, qui correspond donc au but de l'apprentissage. Ce type de scénario permet de s'assurer que les apprenants

construisent des modèles mentaux des composants avant de présenter les relations de causes à effets qui caractérisent le fonctionnement global du système. Les résultats montrent que le préapprentissage entraîne de meilleures performances dans les épreuves de rappel et de transfert.

6- Synthèse du chapitre 3

Les systèmes complexes font partie intégrante de l'environnement des apprenants ce qui en fait des bons candidats pour les utiliser à des fins pédagogiques. Les apprentissages à partir de systèmes complexes peuvent avoir deux types d'objectifs : soit le but est d'apprendre le système lui-même (ses fonctions, son architecture, son comportement comme c'est le cas pour des formations en maintenance, en ingénierie et plus généralement dans les formations professionnelles) ou bien le système est un moyen pour apprendre des règles, des lois, des concepts comme c'est le cas dans les formations à caractère technologique. C'est ce dernier cas qui nous concerne plus particulièrement dans le cadre de cette thèse. Pour étudier des systèmes, il existe deux approches principales qui ne sont pas exclusives entre elles, la pédagogie inductive et la pédagogie déductive. La pédagogie inductive est construite avec une approche qui part du particulier vers le général alors que la pédagogie déductive part du général pour aller vers le particulier. Ces approches relèvent de stratégies pédagogiques, elles n'excluent pas de s'intéresser à la sollicitation du système cognitif au moment même des apprentissages, ce qui se passe « en ligne ». A cette échelle de temps, le problème est le traitement immédiat des informations présentées aux apprenants. Les systèmes complexes sont intéressants pour apprendre mais peuvent paradoxalement mettre en difficulté le système cognitif à cause de leur complexité (nombre important d'informations, interactivité entre elles). Une approche psycho-ergonomique est alors nécessaire pour améliorer les performances d'apprentissage, l'*Instructional Design* permet d'apporter des réponses à la gestion de ces paradoxes.

Chapitre 4

L'Instructional Design :

Une approche psycho-ergonomique de la conception des environnements d'apprentissage de connaissances secondaires

Introduction

Pour que les élèves apprennent des connaissances secondaires de façon efficace, il leur faut recevoir un enseignement direct et explicite en les plaçant dans un environnement d'apprentissage soucieux de leur réussite. Les enseignants accompagnent les élèves dans leur progression en concevant pour eux des environnements d'apprentissage et en les encadrant au cours de l'activité. Il est important de souligner que l'enseignant a normalement des connaissances approfondies dans son domaine disciplinaire et qu'à ce titre, les connaissances qu'il enseigne sont pour lui très peu coûteuses sur le plan cognitif. En face, les élèves ont à construire les mêmes connaissances en traitant des informations nouvelles avec leur mémoire de travail et en faisant des liens avec les connaissances qu'ils ont déjà. Le métier de l'enseignant est donc un métier d'ingénierie pédagogique qui lui demande d'être, en premier lieu, au point dans son domaine disciplinaire (ce qui suppose une actualisation régulière de ses connaissances), de suivre l'évolution des programmes, des référentiels, de la didactique de sa discipline et enfin de connaître des outils, des méthodes, des moyens pour construire les séquences qu'il va proposer aux élèves. En particulier, la conception d'une situation d'enseignement doit conduire à présenter aux apprenants un environnement qui respecte les caractéristiques du système cognitif aussi bien sur les limites étroites des possibilités de traitement de la mémoire de travail, sur la nécessité de traiter le matériel d'apprentissage en profondeur pour améliorer la rétention en mémoire à long terme et sur les atouts du couple mémoire de travail – mémoire à long terme pour faciliter les traitements des nouveautés

présentes dans l'environnement. Pour cela, la conception de la situation d'enseignement doit prendre en compte :

- la correspondance entre les formats de connaissances à faire apprendre et les processus d'apprentissage qui en découlent ;
- la correspondance entre la complexité des supports d'enseignement et les possibilités de traitement de la mémoire de travail ;
- la correspondance entre la profondeur de traitement demandée et les spécificités de la mémoire à long terme du point de vue de l'encodage, de la rétention et de la restitution des informations.

Selon Musial, Pradère et Tricot (2012), le métier d'enseignant consiste à mettre en œuvre des situations et des tâches au cours desquelles les élèves vont mettre en œuvre des apprentissages qui leur permettront d'élaborer des connaissances scolaires. Avant d'entrer dans sa classe, le professeur est donc un ingénieur qui doit concevoir des environnements d'apprentissage fondés l'utilisation d'un ensemble de supports d'informations, de systèmes techniques, de matériels expérimentaux. Pour cela, il doit s'appuyer sur des connaissances scientifiques validées empiriquement sur les processus d'apprentissage des élèves : des théories pédagogiques générales (ex : constructivisme), aux démarches d'enseignement (ex : démarche inductive) jusqu'aux aspects psycho-ergonomiques du traitement des informations durant l'apprentissage.

Ce chapitre présente dans un premier temps les origines et les fondements conceptuels de l'*Instructional Design* en relation avec les différentes théories et méthodes pédagogiques. Dans le cadre des travaux présentés dans cette thèse, nous insisterons sur la théorie de la charge cognitive et sur la théorie des *desirable difficulties*.

Dans un deuxième temps, nous présentons des stratégies particulières d'*Instructional Design* appliquées à l'apprentissage de systèmes complexes (le but est d'apprendre le système complexe) fondées sur des approches globales (*Whole Task Model*) ou des approches par étapes (*Part Task Model*) et des stratégies appliquées à l'apprentissage à partir de systèmes complexes (Le système complexe est un support pour l'apprentissage).

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous traiterons en particulier le cas des apprentissages en deux étapes. Après avoir exposé différentes méthodes d'apprentissage en deux étapes, nous insisterons sur les effets de l'isolement des éléments en interaction et du séquençement de la présentation, le sujet traité dans cette thèse.

1-Positionnement historique et conceptuel de l'*Instructional Design*

1-1 L'*Instructional Design* : une activité de conception de situations d'enseignement

La conception de situations d'enseignement relève de l'ingénierie didactique ou, pour les anglo-saxons, de l'*Instructional Design* qui est un champ de recherche qui s'intéresse aux aspects prescriptifs de la conception de l'enseignement, c'est-à-dire à la manière dont on peut organiser ce dernier pour qu'il soit le plus efficace possible (Dessus, 2006). Selon Musial, Pradère et Tricot (2012), l'*Instructional Design* « consiste à déterminer des dispositifs d'enseignement communicables et reproductibles. Elle évoque l'existence d'une description, d'une étude et de justifications aussi précises et consistantes que possible des conditions d'utilisation de ces dispositifs ». Selon Brousseau (2008), cité par Chevallard (2009, p. 2), l'ingénierie didactique proprement dite « accompagne les dispositifs produits d'un ensemble d'études et d'analyses qui donnent les caractéristiques du produit en référence avec les connaissances scientifiques théoriques et expérimentales du moment.

Ozcinar (2009) cité par Pass, van Merriënboer et van Gog (2011) complète ces définitions en soulignant que l'*Instructional Design* est une science qui élabore des spécifications pédagogiques à partir des théories de l'apprentissage afin d'améliorer la qualité des enseignements destinés aux apprenants et que ce sont les supports et les tâches au sein des dispositifs d'enseignement qui font l'objet de l'étude. Pour Clarebout et Elen (2007) cités par Dessus (2010), les modèles proposés dans le champ de l'*Instructional Design* sont étroitement liés aux théories de l'apprentissage et, comme le soulignent Musial, Pradère et Tricot (2012), ils sont aussi à l'intersection de plusieurs disciplines des sciences humaines mais aussi scientifiques, technologiques ou professionnelles (figure 10)

En résumé, l'ingénierie didactique est principalement caractérisée par sa rationalité, c'est-à-dire que c'est une activité fondée sur la définition préalable des buts à atteindre et sur la mise en œuvre de stratégies pour atteindre ces buts. Les justifications de ces stratégies étant validées par des études scientifiques, théoriques et expérimentales, du moment.

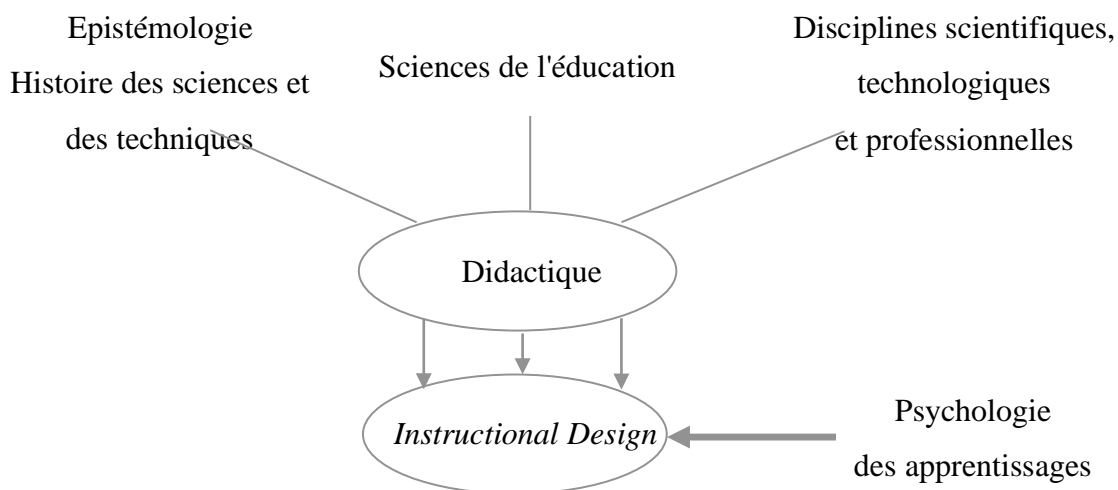


Figure 10 : L'ingénierie didactique à l'intersection de plusieurs disciplines (Musial et Tricot, 2012)

1-2 Bref historique des théories pédagogiques

Jusqu'à la fin du XIX^{ème} siècle et au début du XX^{ème} siècle, l'enseignement avait pour mission de former les enfants à destination du marché du travail sans porter un intérêt systématique sur les résultats obtenus en termes de performances d'apprentissage. Selon Teynnison (2010), les débuts de l'*Instructional Design* peuvent être attribués aux travaux de John Dewey et à ceux d'Edward Thorndike, qui cherchaient, à cette époque, à relier les théories de l'apprentissage du moment à la pratique de l'enseignement dans les écoles. Il est intéressant de noter que Dewey estimait que l'élaboration des programmes d'enseignement devait être fondée sur des contenus et des supports motivants pour les élèves, il rejetait en particulier l'idée que les enfants sont principalement motivés par des récompenses et des punitions. A cette époque, l'instruction était dominée par l'idée que l'esprit, comme le corps, pouvait être développé avec de l'exercice et on pensait que l'étude de certaines disciplines permettrait d'améliorer l'esprit comme la gymnastique améliore certains muscles. De façon générale, pour Thorndike, c'est l'exercice qui renforce la qualité du lien entre la situation à traiter et la réponse produite par l'apprenant. Pour Dewey cité par Westbrook (1993), « la pensée est un instrument qui doit permettre de résoudre les problèmes issus de la vie. La pensée doit nécessairement être mise à l'épreuve de l'action (...), les enfants comme les adultes sont des êtres actifs qui apprennent en affrontant les problèmes qu'ils rencontrent au cours d'activités mobilisant leur intérêt. Pour les uns comme pour les autres, la pensée est un instrument qui leur sert à résoudre les problèmes de leur expérience vécue, et la connaissance

est la sagesse accumulée qu'engendre la résolution de ces problèmes.»

Au cours du XXème siècle, trois approches de l'apprentissage ont influencé les chercheurs dans le domaine de l'*Instructional Design* : le behaviorisme, le cognitivisme et le constructivisme. L'approche behavioriste introduite par Watson au début 1900 a eu un impact très important à l'aube de la deuxième guerre mondiale du fait de l'urgence de former des soldats pour l'armée américaine. Elle est fondée sur l'hypothèse que les états internes des individus ne peuvent pas être observés directement. L'apprentissage est alors envisagé comme un processus stimulus-réponse qui nécessite des périodes de renforcements. Cette approche donne des résultats intéressants pour des objectifs spécifiques qui doivent être atteints de façon très rapide et pour des apprentissages clairement identifiés. L'approche cognitive, qui a commencé à se développer dans les années 1960, résulte de la convergence entre la psychologie cognitive, la théorie du traitement de l'information et l'idée que l'architecture du système cognitif humain est organisée comme un système informatique avec des limitations en termes de capacités de traitement. Elle considère l'apprentissage comme l'acquisition ou la réorganisation de schémas (Good & Brophy, 1990) et se concentre sur la conceptualisation des élèves et sur la façon dont l'information est reçue, organisée, stockée et récupérée, comme nous l'avons présenté dans les premiers chapitres de cette thèse. Au moment de l'apprentissage, l'approche cognitive, caractérisée par le fait que l'élève est considéré comme un participant très actif dans son processus d'apprentissage, s'intéresse plutôt à la manière dont il apprend qu'à la manière dont il répond aux sollicitations. C'est à cette époque qu'apparaît le concept d'analyse de la tâche sous l'influence de Gagné (1965). L'analyse des tâches était alors utilisée pour prévoir les compétences et les connaissances nécessaires à la réalisation d'un travail et pour déterminer comment elles pouvaient être acquises dans les meilleures conditions. L'approche constructiviste se distingue des approches précédentes par le fait que les apprentissages se construisent à partir des interprétations personnelles du monde sur la base des expériences et des interactions individuelles. En d'autres termes, les constructivistes soutiennent que chaque apprenant construit la réalité, l'interprète, en se basant sur la perception de ses expériences passées. La connaissance n'est pas simplement le reflet de la réalité telle qu'elle se présente, mais une construction de celle-ci. Ce sont les travaux de Piaget et de Bruner qui ont porté un éclairage nouveau sur la façon de concevoir l'apprentissage et la connaissance. Par exemple, la théorie constructiviste de Bruner (1966) repose sur l'idée qu'apprendre, c'est construire du sens. Elle se base sur deux principes :

- La connaissance est activement construite par l'apprenant et non passivement reçue de

l'environnement.

- L'apprentissage est un processus d'adaptation qui s'appuie sur l'expérience qu'on a du monde et qui est en constante modification.

Pour l'approche constructiviste, la construction des connaissances est un processus dynamique, où l'apprenant se sert de ses connaissances antérieures pour échafauder de nouvelles connaissances et se développer de nouvelles représentations du monde (schémas). Compte tenu des nouvelles expériences et du contact avec l'environnement, la structure de ces schémas se trouve en constante évolution, ils s'enrichissent et sont de plus en plus adaptables aux situations nouvelles. En d'autres termes, ce qu'un individu apprend dépend de ce qu'il sait déjà, et plus un individu possède des connaissances, plus il peut apprendre.

La chronologie de présentation des différentes théories pédagogiques ne doit pas les hiérarchiser les unes par rapport aux autres. Les connaissances préalables des apprenants, les objectifs de l'enseignement et les apprentissages visés peuvent être de natures très différentes (apprendre des procédures, des concepts, des structures et des fonctionnements complexes, ...) et impliquent donc des processus d'apprentissages différents.

1-3 Théories pédagogiques et *Instructional Design*

L'*Instructional design* s'inscrit dans une approche psycho-ergonomique de la conception des environnements d'apprentissage de connaissances secondaires. Une séquence d'enseignement est pertinente si elle permet aux apprenants d'atteindre efficacement le but des apprentissages visés. Selon Elen et Clarebout (2001), il n'existe pas d'approche pédagogique universelle. Pour Dunbar (2005), le béhaviorisme reste pertinent pour les apprentissages par cœur, pour l'apprentissage de tâches routinières comme la conduite automobile, l'apprentissage de connaissances arbitraires comme celui des verbes irréguliers en anglais, celui des comportements à avoir en cas d'urgence comme par exemple l'évacuation d'un bâtiment en cas d'incendie ou encore dans le cas d'apprentissage de procédures qui doivent être scrupuleusement appliquées comme le massage cardiaque dans le secourisme. Les théories cognitivistes sont plutôt réservées à l'apprentissage de résolution de problèmes, à l'apprentissage de concepts et au raisonnement. Les approches constructivistes sont pertinentes pour les apprentissages à partir d'environnements complexes, les études de cas et la résolution de problèmes réels.

Les théories pédagogiques sont descriptives, elles proposent des modèles pour expliquer le phénomène d'acquisition des connaissances. De son côté, l'*Instructional Design*

prescrit des règles de conception d'environnement pour permettre des apprentissages efficaces de connaissances et de compétences. L'*Instructional Design* considère que l'activité d'enseignement relève de la rationalité c'est-à-dire que pour concevoir un enseignement, il faut avant tout se préoccuper des objectifs à atteindre et ensuite mettre en œuvre les moyens optimaux pour atteindre ces buts. Les moyens choisis sont fondés sur des connaissances scientifiques validées empiriquement. De plus, la rationalité de l'*Instructional Design* permet de rendre communicables les méthodes utilisées et donc de former les enseignants avec des contenus objectivables. Pour Paquette (2002), par rapport aux théories développées en psychologie de l'apprentissage, l'*Instructional Design* peut être vu comme une forme d'ingénierie visant à améliorer les pratiques d'enseignement. Sa relation à la pédagogie est analogue à celle des méthodes de l'ingénieur par rapport aux sciences physiques, ou à celle de la médecine par rapport aux sciences de la vie.

Elen et Clarebout (2007) cités par Dessus (2010) soulignent que les approches théoriques de l'apprentissage ont influencé de nombreux modèles d'*Instructional Design*. Notons en particulier le modèle 4C/ID (van Merriënboer, 1997) en étroite relation avec les théories constructivistes et les théories du double canal introduites dans les modèles de conception multimédia (Mayer, 2001).

1-3-1 Influences de l'approche behavioriste dans l'*Instructional Design*

Dans une perspective behavioriste, le but de l'enseignement est d'obtenir une réponse attendue à partir d'une stimulation cible. La performance des apprentissages est alors évaluée par l'observation de changement de comportement. L'environnement d'apprentissage doit être structuré autour d'une présentation claire de l'objectif et sur la meilleure façon de l'atteindre.

Ally (2004) cité par Njenga (2005) souligne que dans une stratégie pédagogique behavioriste, la conception d'une séquence doit être centrée d'une part sur les apprenants en :

- analysant leurs connaissances préalables afin de démarrer l'enseignement à un niveau adapté ;
- les informant sur les objectifs de l'apprentissage afin de leur donner les moyens d'évaluer eux-mêmes si les résultats obtenus sont conformes aux attentes ;
- encourageant les élèves par des *feed-back* directs lorsque de bonnes réponses sont fournies. ;

puis, d'autre part sur le matériel d'apprentissage en :

- réduisant la difficulté des contenus d'apprentissage en les décomposant de façon appropriée en sous objectifs, en sous domaines ;
- automatisant les sous-habiletés, afin de parvenir à la maîtrise progressive de domaines complexes.

1-3-2 Influences de l'approche cognitive dans l'*Instructional Design*

Avec une approche cognitive, le processus d'enseignement-apprentissage est essentiellement vu comme un processus de traitement de l'information fondé sur des processus internes. Contrairement aux behavioristes, les cognitivistes soutiennent que l'apprentissage ne se définit pas seulement par des changements dans les comportements observables, mais par des changements dans les représentations mentales des apprenants. Pour les cognitivistes, l'apprenant perçoit des informations qui lui proviennent du monde extérieur, les traite, les mémorise, puis les récupère lorsqu'il en a besoin pour comprendre son environnement ou pour résoudre des problèmes. Les processus internes évoqués s'appuient sur une architecture qui utilise principalement une mémoire permettant un stockage temporaire et une mémoire de stockage à long terme.

Dans cette perspective, la conception des séquences d'enseignement doit favoriser l'engagement des apprenants dans les tâches d'apprentissage afin qu'ils puissent traiter les informations en profondeur et non pas uniquement en surface. Ainsi, les concepteurs des environnements d'apprentissage devront insister sur des stratégies visant :

- à aider l'apprenant à encoder les nouvelles informations lui provenant de l'environnement avec des schémas organisateurs au moment d'aborder un nouveau contenu ;
- à l'aider à faire des liens avec ses connaissances antérieures ;
- à lui présenter les nouveaux contenus dans de multiples contextes ;
- à l'engager dans des stratégies d'organisation de ses connaissances en lui demandant par exemple de les retraiter en produisant des résumés, en suscitant un auto-questionnement ;
- à récupérer des informations de sa mémoire à long terme en lui fournissant des indices ou des analogies.

1-3-3 Influences de l'approche constructiviste dans l'*Instructional Design*

Pour les constructivistes, l'apprentissage est un processus actif de construction de la réalité. La

réalité n'existe que dans la tête de l'individu qui lui donne une signification unique à partir de ses propres expériences. L'apprenant ne transfère ou n'intègre pas simplement le savoir provenant du monde externe dans sa mémoire, il construit ses propres interprétations du monde à partir de ses interactions avec celui-ci. Les connaissances n'existent pas en soi en tant que vérités absolues. Les apprenants s'instruisent par l'observation et la recherche. Le processus d'apprentissage constructiviste se déroule en quatre étapes :

- Le processus d'assimilation : c'est le fait pour un apprenant en situation problème de réunir ses connaissances pour trouver une solution ;
- Le conflit cognitif : c'est le fait pour l'apprenant de ne pas trouver de solution au problème qui lui est posé et d'être temporairement déstabilisé ou déséquilibré ;
- L'accommodation : c'est la persévérance de l'apprenant en cas d'échec qui l'amène à réviser ses connaissances, à construire les connaissances qui lui manquent pour s'adapter au problème posé ;
- Le processus d'équilibration : c'est le fait pour l'apprenant de réajuster et restructurer ses connaissances pour mieux résoudre les nouveaux problèmes qui lui seront posés.

Dans cette perspective, la conception des environnements d'apprentissage doit :

- proposer aux élèves des tâches authentiques de la vie quotidienne et/ou en lien avec la réalité professionnelle pour les apprentissages de métier ;
- favoriser la construction et la manipulation de représentations externes comme des graphiques, des modèles analytiques ;
- faciliter les échanges entre les élèves en proposant des moments de discussion collaborative pour harmoniser les représentations

1-3-4 Des influences des théories pédagogiques à la conception ergonomique d'environnements d'apprentissage

Depuis l'approche cognitive, les théories pédagogiques insistent sur le rôle actif de l'apprenant dans le processus de construction du savoir. Collins, Greeno et Resnick (1994) font remarquer qu'aujourd'hui on parle de plus en plus de créer des environnements d'apprentissage à l'intention des apprenants plutôt que d'utiliser des méthodes d'enseignement pour leur transmettre le savoir. En effet, les différentes spécifications relatives à la mise en œuvre des théories pédagogiques ne font jamais explicitement état des atouts et des limites du système cognitif des apprenants en situation de traitement des informations nécessaires aux apprentissages. Nous pouvons y percevoir implicitement des

stratégies en faveur de la profondeur de traitement (relatives aux caractéristiques de la mémoire à long terme) mais pas en ce qui concerne les limitations de la mémoire de travail. La question de l'ergonomie cognitive n'est jamais posée. Ce constat est établi par Tricot et Plégat-Soutjis (2003) qui soulignent qu'une approche ergonomique a rarement été défendue dans le domaine de l'ingénierie pédagogique (ils citent cependant Lohr (2000), Yeaman (1989) et Dennen et Branch (1995)). Pour ces auteurs, la question de l'ergonomie doit conduire à produire un dispositif d'enseignement qui facilite et rend plus efficace l'activité mentale des apprenants dans la situation d'apprentissage. L'*Instructional Design*, par ses validations empiriques, est une activité qui répond à ces contraintes de conception d'environnements d'apprentissage. Enfin, Tricot et Plégat-Soutjis (2003) soulignent que « l'ingénierie pédagogique ne dispose d'aucune solution théorique satisfaisante (constructiviste, interactionniste, béhavioriste, cognitiviste, etc.) mais seulement de solutions locales et conjoncturelles, comme les ingénieries en général. Nous ne comprenons pas l'ingénierie pédagogique qui revendique l'appartenance à un courant ou la référence à un gourou ni les conceptions non cumulatives des sciences de l'éducation ».

1-4 L'*Instructional Design* : une démarche rationnelle de conception d'une situation d'apprentissage

L'*Instructional Design* est une démarche d'ingénierie, elle est fondée sur l'utilisation de connaissances scientifiques et de méthodes pour construire des environnements d'apprentissage. Musial, Pradère et Tricot (2012) insistent sur le fait que les activités d'ingénierie se caractérisent :

- par l'utilisation de méthodes, c'est-à-dire de procédures rationnelles (comme nous venons de les définir), générales (elles ont un domaine de validité important) et communicables (on peut les expliquer à autrui, les décrire, les justifier) ;
- par l'utilisation de connaissances scientifiques, par opposition aux connaissances issues de l'expérience, du bon sens, du goût personnel, etc. ;
- L'utilisation finalisée de connaissances : les activités d'ingénierie consistent à utiliser des connaissances pour concevoir des situations, des solutions. Elles se distinguent en cela du travail d'élaboration de connaissances nouvelles (la recherche), de diffusion de connaissances (la vulgarisation), etc.

Une recherche documentaire sur les modèles d'*Instructional Design* conduit à répertorier deux grandes catégories :

- Des modèles de planification du travail du concepteur qui organisent le processus de la conception depuis l'analyse du besoin, de l'utilité, de l'utilisabilité et l'acceptabilité jusqu'à l'évaluation du produit.
- Des modèles pour concevoir des séquences pédagogiques orientées vers un but (mettre en relation les formats de connaissances à apprendre et les moyens pour y parvenir).

La prise en compte de l'ergonomie cognitive dans le développement des séquences n'apparaît pas dans ces deux premières catégories. Nous proposons donc, dans cette thèse, d'y ajouter une catégorie supplémentaire :

- Des modèles pour prendre en compte les caractéristiques du système cognitif au moment de l'apprentissage. En effet, la complexité de l'environnement donné aux apprenants pour apprendre doit respecter des caractéristiques propres au fonctionnement cognitif des humains (mémoire de travail limitée en quantité et en durée, profondeur de traitement pour favoriser la rétention en mémoire à long terme, ...).

Ci-dessous, nous présentons des exemples de méthodes et de connaissances scientifiques utilisées en *Instructional Design*. Nous proposons trois types de méthodes et de connaissances scientifiques. Dans un premier temps, nous proposons de présenter le modèle ADDIE, une procédure utilisée pour la conduite générale du travail de conception. Ensuite, nous présentons le modèle 4C/ID (*four Components/Instructional Design*) un exemple de connaissance utilisée comme stratégie d'enseignement pour les apprentissages complexes (van Merriënboer, 1997). Le troisième type concerne les aspects ergonomiques qui facilitent le traitement des informations pour les apprenants durant la phase d'apprentissage, nous évoquerons la théorie de la charge cognitive et la théorie des *desirable difficulties* (elles seront détaillées plus loin car elles sont centrales dans l'analyse de nos travaux empiriques).

1-4-1 Un exemple de procédure de conception : le modèle ADDIE

Le modèle ADDIE est apparu en 1975. Il a été développé par le Centre de technologie de l'éducation à l'Université d'État de Floride pour l'armée américaine, puis rapidement adopté par toutes les forces armées américaines. Le modèle ADDIE est une procédure générique très largement utilisée par les concepteurs. Elle permet d'organiser le travail de conception en cinq phases :

- l'Analyse. Cette phase consiste à analyser le besoin de formation en spécifiant les objectifs que les apprenants doivent atteindre et à faire l'inventaire des contraintes

avec lesquelles il faudra composer (le contexte dans lequel s'insère la formation, les ressources existantes) ;

- le **Design** (ou la conception proprement dite). Cette phase vise essentiellement à spécifier les objectifs d'apprentissage et les éléments de contenu qui seront abordés dans la formation, à mettre au point la stratégie pédagogique et à sélectionner les medias d'apprentissage. Parfois, dans les domaines techniques et scientifiques, elle consiste aussi à élaborer des maquettes ou des prototypes inclus dans l'environnement d'apprentissage ;
- le **Développement** (ou la réalisation ou Production). Cette phase consiste à mettre en forme l'environnement d'apprentissage avec les moyens matériels qui ont été sélectionnés (par exemple des logiciels pour un Environnement Informatique pour l'Apprentissage Humain) ;
- l'**Implantation** (ou Diffusion). Cette phase consiste à rendre l'environnement d'apprentissage disponible aux apprenants, ce qui nécessite la mise en place d'une infrastructure organisationnelle et technologique ;
- l'**Évaluation**. Cette phase consiste à porter un jugement sur différentes dimensions (qualité, efficacité) de l'environnement pour valider ou invalider les performances initialement prévues. Plusieurs tests (crash test) peuvent être utilisés pour vérifier si le dispositif présente des lacunes et, le cas échéant, d'y apporter des correctifs avant son implantation à plus large échelle.

Pour une présentation d'autres modèles comme celui de Dick et Carrey ou le modèle de Kemp, voir Njenga (2005).

1-4-2 Un exemple de modèle pour concevoir des séquences pédagogiques orientées vers un but : le modèle 4C/ID pour les apprentissages complexes

Le modèle 4C / ID (van Merriënboer, 1997; van Merriënboer & Kirschner, 2007) est un modèle destiné aux apprentissages de connaissances très complexes dans des domaines mal structurés tels que le diagnostic médical, le contrôle du trafic aérien ou encore le génie logiciel.

L'idée principale de ce modèle est que les environnements d'apprentissage peuvent être décrits à partir de quatre composantes :

- des tâches d'apprentissage concrètes et significatives de celles pour lesquelles l'environnement est construit ;

- des informations qui permettent de faire le lien entre les connaissances antérieures des apprenants et les tâches d'apprentissage prévues.
- des informations spécifiques et contextuelles apportées au moment où l'apprenant en a besoin pour avancer dans son apprentissage ;
- la mise en pratique de tâches partielles comme exercices complémentaires pour les entraîner avec un haut niveau d'automatisme (van Merriënboer, Clark, et de Croock, 2002).

Le modèle 4C/ID est utilisé pour développer des programmes de formation pour les compétences complexes transférables dans d'autres contextes. Ce modèle est plutôt adapté pour des programmes de formation sur une durée importante (des semaines, des mois ou même des années).

1-4-3 L'intégration de l'ergonomie cognitive dans la conception de séquence d'apprentissage.

Les apprentissages de connaissances secondaires, comme la plupart de celles que nous apprenons à l'école, se font à l'aide d'enseignements directs et explicites et demandent un coût attentionnel important, une motivation importante. Les connaissances sur les limites et les atouts du système cognitif sont des outils supplémentaires pour améliorer encore la conception des environnements d'apprentissage. Lorsque les limitations de la mémoire de travail sont atteintes, les travaux empiriques montrent que l'apprentissage peut être détérioré ou ne conduire à aucun apprentissage, si les informations ne sont pas traitées en profondeur, nous savons que les informations ne seront pas retenues. Il est important de noter et nous insistons sur le fait que les aspects ergonomiques de la situation d'apprentissage s'intègrent dans le traitement *on line* du matériel d'apprentissage, c'est-à-dire dans la temporalité immédiate de l'activité des apprenants. Les modèles retenus pour la conception ergonomique des environnements d'apprentissage vont donc s'intéresser à la sollicitation de la mémoire de travail en cherchant à évaluer le coût puis à contrôler les différentes opérations imposées par les tâches et supports donnés aux apprenants. Nos travaux se sont focalisés sur la théorie de la charge cognitive (Sweller, 1994) et sur la théorie des *desirable difficulties* (Clark et Bjork, 2014).

1-4-4 Synthèse

L'*Instructional Design* est une démarche rationnelle de conception d'une situation d'apprentissage qui s'appuie sur des modèles validés par des travaux empiriques. Il existe des modèles à tous les niveaux de la conception, depuis la démarche de conduite du projet

jusqu'au réglage fin des activités données aux apprenants en faveur du traitement efficace des informations pour apprendre.

2- Les courants théoriques pour la conception ergonomique en *Instructional Design*

Dans le contexte de cette thèse, nous allons détailler plus particulièrement la théorie de la charge cognitive qui est plutôt orientée sur les limites de traitement de la mémoire de travail et la théorie des « *desirable difficulties* » qui se focalise sur les problématiques liées à la rétention des informations en mémoire à long terme et au transfert des connaissances.

2-1 La Théorie de la charge cognitive

La théorie de la charge cognitive, énoncée au début des années 1980 par John Sweller, professeur en éducation à l'Université de New South Wales à Sydney en Australie, rend compte des aspects cognitifs mis en jeu lors de phases d'apprentissage (pour une présentation complète, voir Tricot, 1998). Cette théorie s'appuie sur le modèle du système cognitif proposé par Baddeley (1998). Ce modèle est fondé sur une architecture composée principalement d'une mémoire de travail dont la capacité est limitée et d'une mémoire à long terme sans limite de capacité et, à priori, sans limite de durée de rétention. La mémoire à long terme stocke des connaissances sous forme de schémas automatisés qui sont activés puis confrontés aux informations récupérées dans l'environnement par la mémoire de travail. L'apprentissage est alors vu comme une modification, une évolution de ces schémas.

Tout traitement d'une situation contrôlée comme celles rencontrées lors de apprentissages non adaptatifs par enseignement engendre l'utilisation d'une quantité importante de ressources mentales et pour Tricot et Chanquoy (1996), la charge cognitive « mesure la quantité de ressources mentales mobilisée par un sujet lors de la réalisation d'une tâche. Elle est donc fonction des difficultés de traitement imposées par la tâche ». Dans un premier temps, les travaux sur la charge cognitive se sont intéressés aux circonstances qui engendrent un coût de traitement important ainsi qu'aux moyens à mettre en œuvre pour réduire la charge cognitive. Trois catégories de situations ayant un impact important sur la charge cognitive ont été identifiées :

- le partage attentionnel où les ressources mentales engagées doivent être partagées entre plusieurs traitements devant être réalisés simultanément. Cet effet peut être simplement mis en évidence par des paradigmes de double tâche et a donné lieu par la suite à de nombreux travaux sur la mémoire de travail.

- La présentation d'informations en mode duel. Cet effet est, par exemple, mis en évidence dans l'intégration texte-image. Une figure complexe présentée avec un texte séparé qui renvoie à un grand nombre de points de connexion présente un degré d'interactivité important peut induire une forte charge cognitive (pour une revue voir les travaux de Bétrancourt et Caro, 1998) ; cet effet a donné lieu par la suite à de nombreux travaux sur l'apprentissage multimédia (Mayer, 2001, 2005, cité par Chanquoy, Tricot et Sweller, 2007).
- Le niveau d'expertise des utilisateurs. L'expertise est sous tendue par la facilité à mobiliser dans un domaine particulier, un grand nombre de connaissances peu coûteuses à utiliser. Cet effet a donné lieu par la suite à de nombreux travaux sur l'association mémoire de travail – mémoire à long terme (Anderson, 1995).

Les chercheurs dans le domaine de la théorie de la charge cognitive ont mené de nombreuses études pour identifier quelles conditions favorisent les apprentissages « complexes ». Dans cette optique, la théorie de la charge cognitive s'appuie sur les propriétés de la mémoire humaine, notamment sur la dichotomie entre mémoire de travail et mémoire à long terme. Ainsi, la performance d'apprentissage dépendra à la fois de la quantité de ressources nécessaires pour traiter les informations inhérentes au savoir objet de l'apprentissage mais aussi de la quantité de ressources disponibles en mémoire de travail. L'apprentissage peut demander un effort très important aux apprenants, qui doivent partager leurs ressources cognitives disponibles en mémoire de travail entre les différentes opérations imposées par les tâches et supports qui leur sont présentés. Dans ce cadre, la théorie de la charge cognitive (Sweller & Chandler, 1994 ; Sweller, van Merriënboer & Pass, 1998 ; Pass, Renkl et Sweller, 2004 ; van Merriënboer et Sweller, 2005) distinguent trois types de charge cognitive :

- la charge cognitive intrinsèque. Cette charge cognitive est liée à la réalisation de la tâche d'apprentissage et au traitement cognitif du support de celle-ci. Elle correspond à toutes les informations qu'il faut traiter simultanément pour apprendre. La charge cognitive intrinsèque va être d'autant plus importante que la quantité d'information sera importante mais elle va surtout dépendre du niveau d'interaction qui existe entre les informations.
- la charge cognitive pertinente. La charge cognitive pertinente est celle qui permet l'acquisition et l'automatisation de schémas. Cette charge cognitive est imposée par la

« distance » entre la connaissance à apprendre et celle de l'individu qui apprend. Plus cette distance est importante, moins l'individu a de connaissances préalables sur le sujet à apprendre et plus il lui sera nécessaire d'utiliser des ressources pour créer des schémas qui vont lui libérer des ressources en mémoire de travail et faciliter son apprentissage.

- la charge cognitive inutile. Cette source de charge cognitive est liée à l'organisation du support d'apprentissage et aux activités réalisées par les apprenants qui ne sont pas directement liées à l'élaboration de connaissances. Elle correspond à toutes les informations superflues, non nécessaires à l'apprentissage.

A titre d'exemple, l'étude des dipôles passifs en électrocinétique (figure 11) consiste à apprendre et à manipuler les relations qui existent entre le courant $i(t)$ qui circule dans le dipôle et la tension $u(t)$ présente à ses bornes. Le dipôle passif peut être soit une résistance R , soit un condensateur C , soit une inductance L (symboles aux normes européennes).

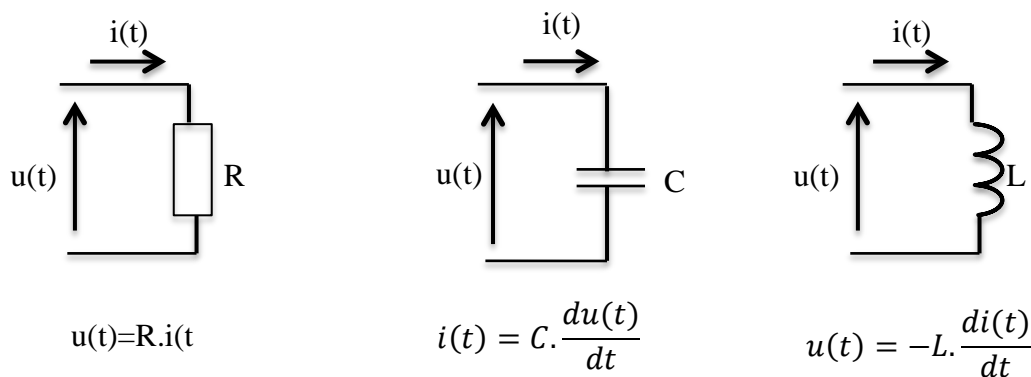


Figure 11 : Etude des dipôles passifs en électrocinétique

Dans cet exemple, la charge cognitive intrinsèque provient de la distinction à faire entre les trois types de dipôles, les conventions de signe utilisées et les relations courant-tension qui s'appliquent dans chaque situation. La charge cognitive pertinente va varier en fonction des connaissances initiales des apprenants : pour les dipôles L et C , les relations courant-tension sont régies par des équations qui comportent des dérivations par rapport au temps et pour comprendre ces relations, il est nécessaire de connaître au préalable la notion de dérivée en mathématiques. La charge cognitive inutile pourrait apparaître si, par exemple, nous mélangions des symboles normalisés américains et européens. Pour une résistance, le

symbole américain est représenté en figure 12 :

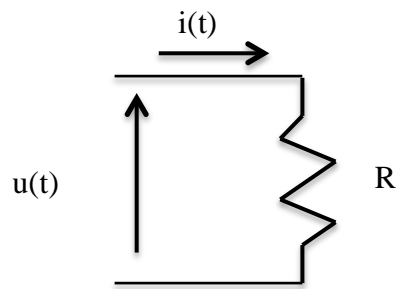


Figure 12 : Le symbole américain d'un dipôle « Résistance »

Ce symbole est proche de celui d'une inductance dans les conventions européennes et demande une attention qui n'apporte rien du point de vue de l'apprentissage des relations électrocinétiques.

Pour faciliter les apprentissages et donc favoriser l'élaboration de connaissances, l'idée est de limiter au maximum la charge cognitive inutile et de manipuler la charge cognitive intrinsèque afin de dégager des ressources cognitives pour apprendre. En effet, un apprentissage ne peut se faire que si l'apprenant possède suffisamment de ressources pour construire des schémas. Quand la réalisation de la tâche d'apprentissage est très coûteuse du fait de la complexité du contenu et de l'organisation du matériel, l'activité peut ne conduire à aucun apprentissage.

Avec la théorie de la charge cognitive, les auteurs montrent de façon empirique comment la conception des outils d'enseignement peut réduire avec succès la charge cognitive inutile, augmenter la charge cognitive pertinente et manipuler la charge intrinsèque. Les effets suivants sont décrits dans la littérature traitant de la théorie de charge cognitive (Sweller, van Merriënboer & Paas, 1998) et Tricot (1998) pour une revue en français. Nous présentons ici deux effets :

- l'effet du problème résolu (*worked example effect*) : cette stratégie consiste à donner aux apprenants des problèmes résolus à étudier. La théorie de la charge cognitive suggère que l'activité de résolution de problèmes mobilise des ressources pour traiter à la fois le but du problème, les données contextuelles et rechercher de la procédure de résolution (par une stratégie essais / erreurs, par exemple). Selon le niveau de difficulté et les connaissances préalables des apprenants, cette situation peut induire une forte charge cognitive qui va rendre difficile l'apprentissage. Le fait de donner aux apprenants des problèmes résolus à étudier leur permet de les guider dans la résolution

et de libérer ainsi des ressources pour intégrer le schéma de résolution. L'effet du problème résolu peut aussi s'expliquer par le fait que le guidage proposé pour la résolution se substitue à l'administrateur central de la mémoire de travail et permet donc de libérer des ressources nécessaires à la création des schémas (Kirschner, Sweller & Clarck, 2006) ;

- l'effet de modalité (*modality effect*) : lorsque la compréhension implique l'intégration de plusieurs sources d'information, il est généralement plus efficace de présenter les deux sources d'information dans des modalités différentes (auditive et visuelle), plutôt que de présenter le matériel d'une façon physiquement intégrée (visuelle seule). On peut partager l'attention, mais en utilisant des canaux sensoriels différents, pour ne pas charger l'un des composants de la MDT (Tindall-Ford, Chandler & Sweller, 1997). La présentation des informations sous plusieurs modalités est aujourd'hui facilitée par l'utilisation des technologies numériques multimédias.

Dans le cadre de cette thèse, nous allons examiner l'effet des éléments interactifs présentés isolément (*isolated interacting effect*) qui se présente comme une stratégie de manipulation de la charge cognitive intrinsèque. Pour traiter un matériel d'apprentissage complexe, c'est-à-dire composé d'un grand nombre d'informations en interaction, la mémoire de travail risque d'être en dépassement de capacité de traitement à moins de faire appel à des schémas. Nous observons ici un paradoxe puisque pour traiter du matériel complexe, la mémoire de travail a besoin de faire appel à des schémas en mémoire à long terme mais pour construire des schémas, la mémoire de travail doit traiter des informations.

La manipulation de la charge cognitive intrinsèque peut consister à fractionner la complexité du contenu à apprendre en organisant une progression de l'apprentissage en plusieurs étapes. Pour réduire temporairement la charge cognitive intrinsèque, la solution peut être fondée sur le séquençement des informations présentées. Ces stratégies sont généralement fondées sur des scénarios qui se déroulent en deux étapes. La première étape est conçue pour que les apprenants soient en situation de charge cognitive « raisonnable » afin d'aborder la deuxième étape avec des schémas déjà construits.

La théorie de la charge cognitive est fondée sur l'idée que la mémoire de travail a une capacité limitée et que l'apprentissage peut être moins performant si les tâches demandées la sollicitent de manière trop importante. Cette théorie peut être vue comme une approche « comptable » des ressources mobilisées dans les situations d'apprentissage mais elle ne rend

pas explicitement compte de l'engagement des apprenants et de ce qui permet l'élaboration des connaissances et, en particulier, la profondeur de traitement. Pour ce dernier aspect, nous proposons de faire appel à la théorie des « *desirable difficulties* »

2-2 Le courant théorique des « *desirable difficulties* »

Ce courant théorique introduit par Bjork (Bjork & Bjork, 2011), dans les années 1990, est fondé sur l'idée que l'ajout de difficultés dans le traitement d'un matériel d'enseignement peut augmenter les performances d'apprentissage (De Corte, 2003; Roediger & Karpicke, 2006; Schmidt & Bjork, 1992). Selon Bjork, les *desirable difficulties* (il n'y a pas d'équivalent en français mais nous proposons ici « difficultés pertinentes pour améliorer l'apprentissage ») sont bénéfiques dans la mesure où elles induisent des traitements en profondeur favorables aux processus de rétention et de récupération des informations en mémoire à long terme. Les auteurs qui soutiennent cette théorie défendent par ailleurs l'idée que la performance des apprentissages ne se mesure pas simplement à l'issue de la session de formation mais aussi dans le temps et en particulier dans le transfert (Roediger & Karpicke, 2006; Schmidt & Bjork, 1992).

Les *desirable difficulties*, introduites dès la conception du matériel d'apprentissage, induisent principalement deux types de comportements chez les apprenants :

- Un comportement métacognitif qui invite l'apprenant à prendre conscience de ses apprentissages en proposant un enseignement distribué (réparti sur plusieurs séances) plutôt que concentré sur une même séance (Baddeley & Longman, 1978; Dempster, 1988; Son & Simon, 2012) et de tester régulièrement ce qui est appris (Roediger & Karpicke, 2006) ou encore en incitant les apprenants à élaborer leurs connaissances en les conduisant à créer des liens entre les informations qu'on leur présente, plutôt que de lire passivement ce qui est écrit (McDaniel et al., 1994) ;
- Un renforcement de l'attention en introduisant par exemple des défauts structurels dans la présentation du matériel. Par exemple, fournir un matériel d'apprentissage qui manque d'organisation (McNamara et al., 1996) ou qui utilise des polices de caractères qui sont légèrement plus difficiles à lire (Diemand-Yauman, Oppenheimer & Vaughan, 2010).

L'introduction de *desirable difficulties* dans la conception des séquences d'enseignement est partiellement soutenue par la théorie de la région proximale d'apprentissage (Metcalf, 2011). Cette théorie fait écho aux théories du développement de

Piaget et de Vygotsky. Il s'agit d'une zone qui se situe entre un seuil où l'apprenant maîtrise un sujet en toute autonomie et un seuil où, avec ses connaissances, l'apprentissage ne lui sera pas accessible sans aide. Le fait de proposer aux apprenants un enseignement qui ne se situe pas dans cette zone sera une source d'échec et de démotivation. En d'autres termes, si on propose une activité trop facile, l'apprenant s'ennuie et peut même se sentir déconsidéré, pas reconnu à sa valeur, et, d'un autre côté, si l'activité est trop difficile, l'apprenant se démotive car la marche à gravir s'avère trop importante.

Nous observons ici que le niveau de difficulté du matériel présenté aux apprenants peut déterminer le niveau de leur engagement dans la tâche d'apprentissage et, en d'autres termes, leur motivation. Dans cette perspective, Bandura et Locke (2003) insistent sur le fait que les apprenants sont naturellement motivés pour se lancer dans des activités qui offrent un enjeu ou qui relèvent du défi. Cependant, l'engagement dans la tâche d'apprentissage dépend des exigences de la tâche et des caractéristiques individuelles de l'apprenant telles que ses connaissances préalables, sa motivation (Ariel, Dunlosky, & Bailey, 2009 ; Efklides, 2011) et, *in fine*, son jugement sur l'apprentissage qu'il doit réaliser (Metcalf, 2009). Par exemple, Koriat (1997) a fait valoir que les jugements sur les apprentissages sont des jugements heuristiques fondés sur trois catégories de propriétés du matériel présenté. Des propriétés intrinsèques qui donnent des indices sur la facilité ou la difficulté *à priori* de l'apprentissage, des propriétés extrinsèques qui se rapportent aux conditions de l'apprentissage (par exemple, le temps de présentation, la profondeur de traitement demandée) et des propriétés mnémoniques qui peuvent signaler à l'apprenant si les éléments qu'ils traitent seront utiles plus tard. Par ailleurs, Metcalf et Kornell (2005) soutiennent que, lors des apprentissages, les apprenants tendent à éliminer les éléments de l'étude qui leur sont déjà connus et que parmi les éléments inconnus, ils continuent de consacrer du temps à l'étude d'un élément aussi longtemps qu'ils perçoivent l'apprentissage, mais s'arrêtent quand ils estiment que l'apprentissage n'est plus payant.

En conclusion, la théorie des *désirable difficulties* est fondée sur des principes de psychologie cognitive (profondeur de traitement pour favoriser la rétention en mémoire à long terme, orientation de l'attention) mais aussi sur des dimensions d'engagement relatives au contrôle métacognitif des apprenants en phase d'apprentissage.

2-3 Implications dans cette thèse

Le développement de supports d'apprentissage pour apprendre à partir d'environnements

complexes nécessite d'employer des stratégies qui vont alléger le traitement par la mémoire de travail des nombreuses informations parfois très interactives qui composent le matériel. Cette direction de développement, très centrée sur les limites de la mémoire de travail et soutenue par la théorie de la charge cognitive doit permettre tout de même un traitement en profondeur du matériel à apprendre pour avoir une meilleure rétention en mémoire à long terme. Avec le point de vue de la théorie de la charge cognitive, l'apprentissage dans un environnement complexe sera envisagé avec un fractionnement de la complexité en introduisant une progression qui va du simple vers le complexe, mais avec la théorie *desirable difficulties*, la progression pourra être envisagée en introduisant un scénario qui va du complexe vers le simple pour donner aux apprenants un jugement positif sur la situation d'apprentissage.

Les résultats empiriques, dans le champ de la théorie de la charge cognitive, montrent qu'un séquençement qui progresse du simple vers le complexe, améliore sensiblement les performances d'apprentissage mais van Merriënboer, Kester et Paas (2006) soutiennent que ce sens de progression peut conduire à un paradoxe : ces approches conduisent souvent à des augmentations de performances en rappel mais diminuent les performances en situation de transfert. La théorie des *desirable difficulties* semble apporter des éléments en faveur d'une présentation du complexe vers le simple.

Enfin, Kalyuga (2011) soutient que pour maintenir la concentration et prêter continuellement attention aux informations présentées, les apprenants doivent être en mesure d'allouer leurs ressources disponibles en mémoire de travail pour le traitement des éléments d'information essentiels pour l'apprentissage. La quantité de ressources en mémoire de travail consacrées à l'apprentissage productif dépend non seulement de la réduction de la charge cognitive inutile, mais aussi, et de façon aussi importante, de la motivation et de l'engagement dans la tâche des apprenants. Les méthodes et les techniques spécifiques pour favoriser la motivation des apprenants sont des facteurs critiques dans l'enseignement qui s'étend bien au-delà des limites de la théorie de la charge cognitive.

Le but de cette thèse est d'explorer les limites de la théorie de la charge cognitive dans des apprentissages en environnements complexes.

3- Conception de dispositif pour enseigner des connaissances complexes : le séquençement des informations

La plupart des méthodes d'apprentissages qui ont été développées au cours du vingtième siècle étaient basées sur des approches qui décomposaient la globalité des apprentissages en plusieurs parties afin d'atténuer les difficultés rencontrées par les apprenants. Ces modèles

appelés « *Part Task Models* », pouvaient relever du bon sens mais ont été remis en question (Merril, 2002 ; van Merriënboer, 2007) durant les deux dernières décennies par des modèles « *Whole Task Models* » basés sur des approches globales de l'apprentissage.

3-1 Les *Part-Task Models*

L'apprentissage basé sur le *Part-Task Model* est réalisé à partir d'un environnement qui découpe l'apprentissage en deux temps. Dans un premier temps, l'apprentissage est réalisé à partir de tâches partielles construites pour alléger la difficulté de la tâche complexe initiale. Dans un second temps, les apprenants sont confrontés à la tâche complexe dans sa totalité. Teague, Gittelman et Park (1994) insistent sur le fait que cette stratégie de formation justifie son intérêt dans la réduction du coût de l'apprentissage en utilisant du matériel simplifié par rapport à celui utilisé dans la tâche complexe initiale (utilisation de simulateurs dédiés à des entraînements spécifiques, par exemple), qu'elle permet de diminuer les risques d'accident et qu'elle permet d'entretenir des compétences particulières rarement mises en œuvre (notamment dans le domaine militaire). Wightman et Lintern (1985), cités par Roessingh, Kappers et Koenderink (2002) suggèrent que la tâche complexe peut être découpée en tâches partielles selon trois modalités : la segmentation, le fractionnement et la simplification. Dans le cas de la segmentation (fig 13), la tâche complexe est divisée en sous-tâches dont les contours spatiaux et temporels sont bien identifiés. C'est en particulier le cas quand les sous-tâches sont exécutées de façon sérielle dans la tâche complexe initiale. Par exemple, dans la conduite automobile, les parcours urbains, extra urbains, sur autoroute, sur piste.

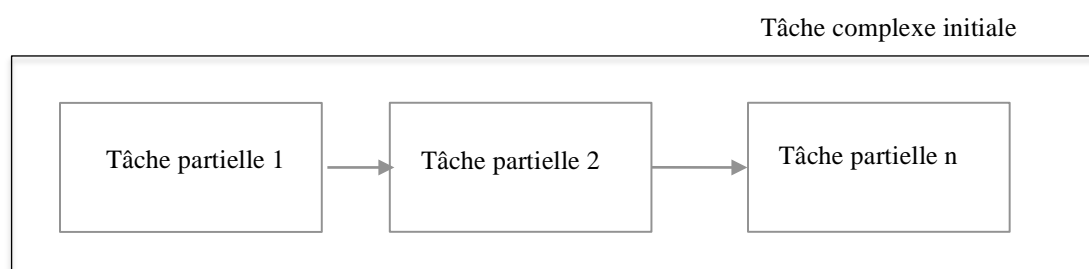


Figure 13 : Décomposition d'une tâche complexe en tâches partielles par segmentation. Wightman et Lintern (1985)

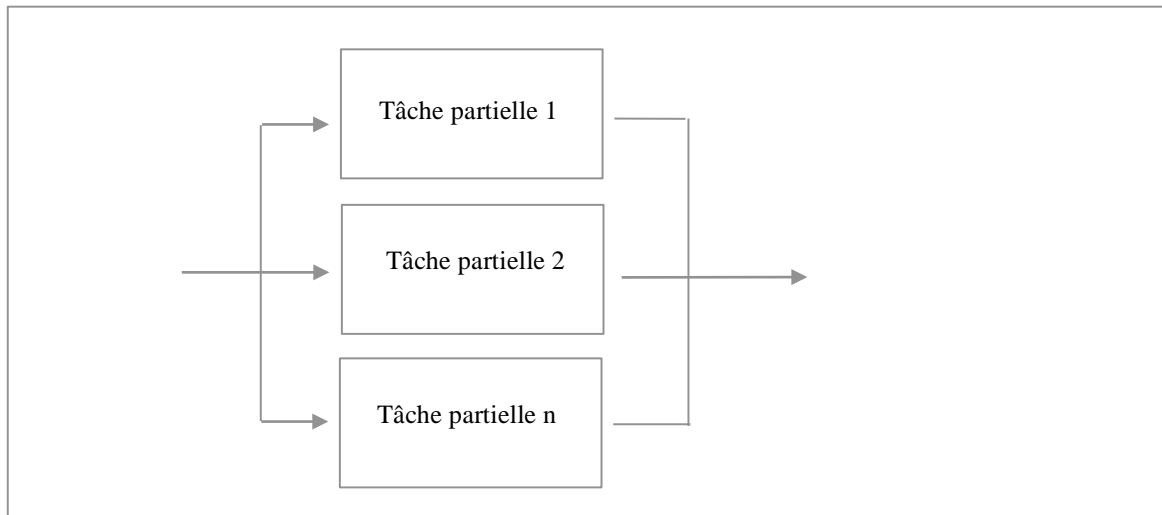


Figure 14 : Décomposition d'une tâche complexe en tâches partielles par fragmentation Wightman et Lintern (1985)

La fragmentation (fig 14) est une modalité applicable lorsque la tâche complexe initiale est composée de plusieurs tâches partielles qui sont exécutées en parallèle. Par exemple piloter un avion, et simultanément assurer les communications radio et préparer un atterrissage sur un terrain inconnu.

Enfin, la simplification (fig 15), consiste à présenter la tâche complexe initiale en supprimant une partie de ses exigences. Par exemple, dans les sports de combat, la simplification consiste à proposer des séquences d'entraînements avec incertitude restreinte en obligeant l'adversaire à n'utiliser que ses poings ou que ses jambes.

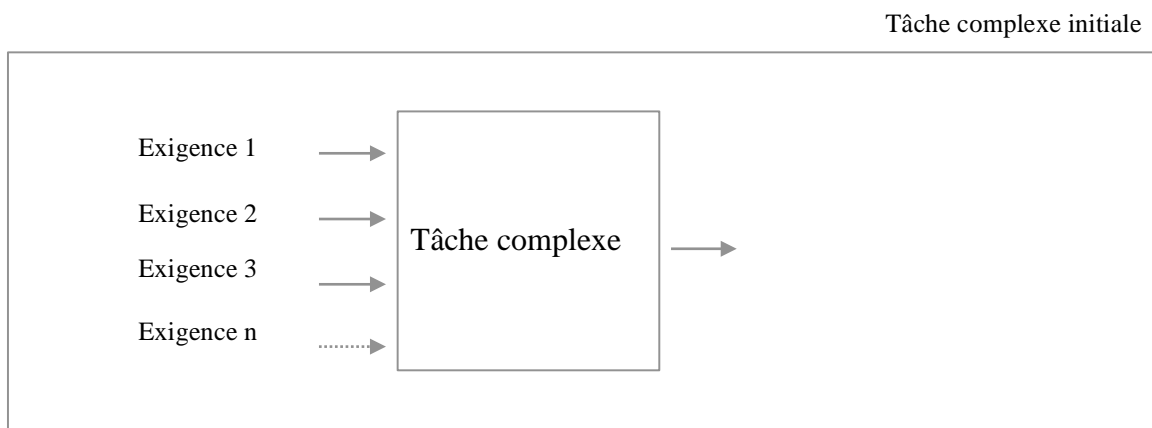
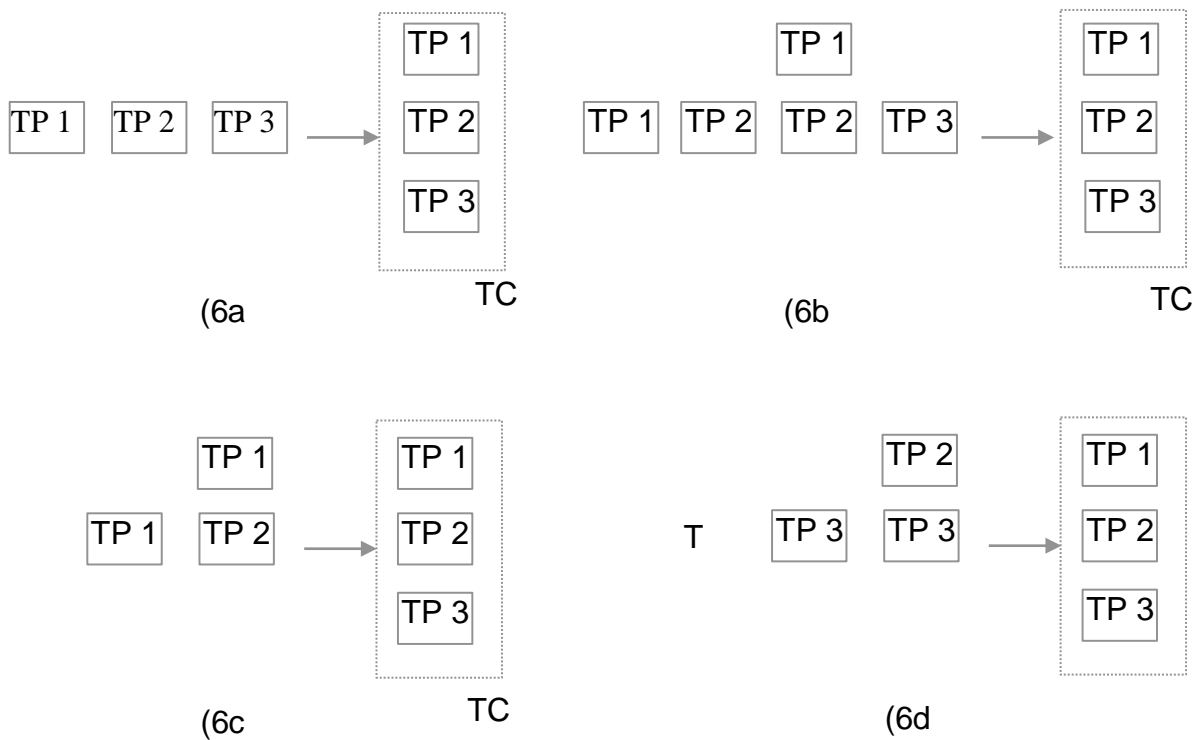


Figure 15 : Décomposition d'une tâche complexe en tâches partielles par simplification Wightman et Lintern (1985)

Dans certains cas, des tâches partielles doivent être préalablement acquises avant de présenter les autres. Elles sont alors, de fait, introduites au début du séquençage de l'apprentissage.

Pour réinvestir l'apprentissage des tâches partielles dans la tâche complexe initiale, c'est-à-dire construire la deuxième phase de l'apprentissage, quatre types de scénarios sont proposés par Proctor et Dutta (1995). Le premier (fig 16a) consiste à mobiliser simultanément les tâches partielles apprises isolément, dans la tâche complexe initiale (nommé *pure-part learning* dans la littérature anglo-saxonne). Le deuxième scénario (fig 6b) associe les tâches partielles deux à deux pour arriver progressivement à la tâche complexe initiale (*forward chaining snowballing*). La troisième possibilité, (fig 16c) qui repose sur une stratégie cumulative, la première tâche partielle est apprise seule puis une deuxième tâche partielle est ajoutée et ainsi de suite (*progressive part*). Enfin, dans la même idée que la précédente formule (fig 6d), la tâche partielle apprise en dernier est mobilisée en premier lieu et une stratégie cumulative est adoptée dans le sens inverse de ce qui est proposé dans la modalité représentée en fig 6c (*backward chaining*).



Tâche complexe (TC) décomposée
en 3 tâches partielles (TP)

Fig 16 : Intégration des tâches partielles dans la tâche complexe

Une autre possibilité de séquençage (ordre et définition des tâches), suggérée par Gagné (1968) est basée sur une approche hiérarchique. L'enchaînement est alors organisé de manière à ce que les tâches partielles se succèdent en s'assurant que l'apprenant maîtrise la tâche précédente.

La décomposition de la tâche complexe initiale pose le problème de la frontière de la définition des tâches partielles. Teague, Gittelman et Park (1994), ont défini deux types de présentation pour les tâches partielles : celles qui sont basées sur un système d'informations complètement isolé du système tel qu'il existe en réalité (*context-independent*) et celles qui sont construites à partir d'un système d'informations partiellement isolé (*context-dependent*). Par exemple ces auteurs ont expérimenté ces deux modalités de présentation dans l'apprentissage de montages électroniques. Pour la modalité *context-dependent*, ils ont présenté les composants électroniques de base dans un schéma électronique en expliquant comment ils étaient connectés entre eux et la façon dont ils interagissaient entre eux. Pour la modalité *context-independent*, les composants électroniques sont présentés indépendamment d'un circuit électronique. Park, Teague et Gittelman (1994) ont montré que dans les situations

de transfert, la présentation isolée des éléments a donné de meilleures performances que la présentation partiellement isolée. En revanche, la présentation des éléments partiellement isolés a donné de meilleures performances dans des situations similaires à celle de l'apprentissage.

L'approche *part task*, apparue au début du 20ème siècle, partait de l'hypothèse qu'un apprentissage de tâches complexes réalisé à partir de tâches simples donnerait de meilleures performances qu'un apprentissage de la tâche complexe directement. Cette approche a montré de bonnes performances lorsque le système était composé d'un petit nombre d'éléments très peu interconnectés mais elle a été remise en cause dès les années 1960 car elle ne donnait pas de bonnes performances lorsque la tâche complexe supposait l'intégration de nombreuses compétences et connaissances. Elle a été aussi remise en cause dans le cas du transfert des compétences complexes dans des nouvelles situations (Naylor & Briggs, 1963, cités par Lim, 2006).

3-2 Les *Whole Task Models*

Apparu fin des années 1980 début des années 1990 dans les domaines de l'enseignement de la communication et des technologies, ces modèles sont un héritage des méthodes étudiées et utilisées dans les apprentissages moteurs, par exemple dans le cas du tennis (par exemple, Gallwey, 1974). Ces modèles s'intéressent, comme les précédents, aux apprentissages de contenus et de tâches très complexes mais avec une approche alternative. Les « *Whole Task Models* », considèrent le système d'informations complexes comme un ensemble cohérent d'éléments interconnectés. L'apprentissage débute avec une forme simplifiée, mais encore significative de la tâche ou du contenu complexe, et se construit petit à petit en proposant aux apprenants des formes de plus en plus proches de la forme complexe constituant l'objectif de l'apprentissage (Reigeluth, 1999 ; van Mërrienboer et al., 2003). Cependant, si la forme la plus simple reste encore trop difficile à appréhender pour les apprenants, un séquençement avec une stratégie du type « *Part Task Model* » pour rendre l'apprentissage plus accessible peut être proposée.

Selon Merrienboer et Kirchner (2007), les « *Whole Task Models* » ont pour but de pallier à trois écueils du « *Part Task model* » :

- la fragmentation qui gêne les apprenants dans le réinvestissement des nombreux apprentissages partiels dans la tâche complexe du fait du gros effort à fournir pour prendre en compte leurs interactions pour les relier ;
- la compartimentation qui contribue à décomposer un ensemble complexe en parties

distinctes et qui ne privilégie donc pas un apprentissage mettant en œuvre des compétences interdisciplinaires ;

- le paradoxe qui existe avec l'approche « *Part Task Model* » qui donne de très bonnes performances dans les apprentissages spécifiques, mais qui ne permet pas d'atteindre des résultats satisfaisants en termes d'agrégation et de transfert des apprentissages.

Selon les mêmes auteurs, ces modèles se distinguent des « *Part Task models* » car la confrontation avec des tâches globales est perçue par les apprenants comme des situations motivantes qui vont leur permettre de construire des apprentissages complexes. Ces modèles ont aussi la particularité d'être centrés sur les apprenants en favorisant leur perception d'être responsable de leur progression et enfin ils apportent des performances accrues du point de vue du transfert des apprentissages. De plus, les approches globales, contrairement aux approches partielles, visent à l'intégration simultanée des apprentissages procéduraux, déclaratifs et affectifs.

Salden, Pass et van Mërrienboër (2006) rappellent que la demande de formation dans de nombreux domaines sensibles comme le contrôle aérien ou l'industrie chimique est très importante car des erreurs humaines peuvent provoquer des situations dangereuses et très coûteuses, mais que d'un autre côté, les temps consacrés à la formation sont limités. Dans cette perspective, ils ont comparé différentes approches du point de vue de l'individualisation des apprentissages et de la transférabilité des compétences acquises par les apprenants dans d'autres contextes. Dans un premier temps, ces auteurs font la distinction entre une approche statique et une approche dynamique du programme d'apprentissage. Dans les deux cas, l'état des connaissances préalables des apprenants est pris en considération mais dans la version statique, le formateur fixe un scénario avant le début de la séquence d'apprentissage alors que dans la version dynamique, le formateur peut apporter des ajustements en cours de séquence. Ensuite, à partir de cette distinction (fig 17), ils passent en revue toutes les combinaisons avec les modalités « *Part Task Models* » et « *Whole Task Models* ».

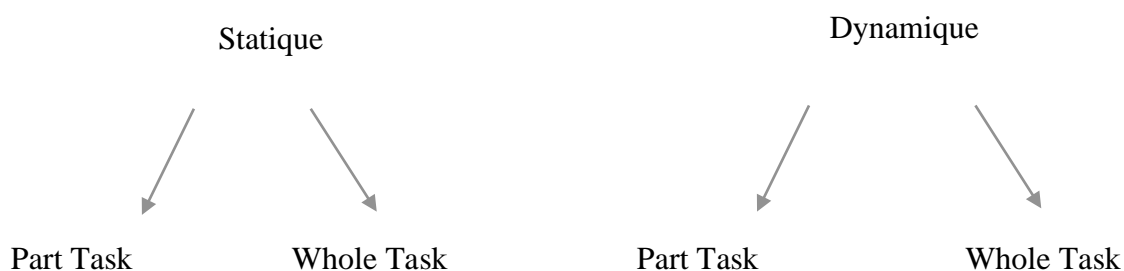


Fig 17 : Différentes approches de séquences d'apprentissage selon Salden & al. (2006)

Globalement, les résultats montrent que les « *Whole Task Models* » en version dynamique offrent de nombreux avantages par rapport aux « *Part Task Models* ».

	Statique		Dynamique	
	Part Task	Whole Task	Part Task	Whole Task
Détermination claire des tâches d'apprentissage	-	+	-	+
Pas de contraintes d'intégration	-	+	-	+
Possibilité d'ajuster la séquence d'apprentissage pendant son déroulement	-	-	+	+
Possibilité d'utiliser la charge cognitive pour choisir les tâches	-	-	+	+
Adaptation aux tâches très complexes	-	+	-	+

Tableau 1 : Analyse comparative des différents dispositifs

3-3 Implications dans le contexte de cette thèse

Les apprentissages pour la conduite de systèmes complexes ont débuté par des stratégies allant du simple vers le complexe en construisant des séquences partant de tâches partielles pour accumuler des compétences et les réinvestir dans la tâche globale. Ces stratégies, partant de l'idée qu'un découpage de la tâche complexe en tâches plus simples permettrait de soulager l'effort consenti par les apprenants ont été remises en question après quelques décennies. En effet, l'apprentissage à partir de tâches partielles montrait des déficits en termes performances car les apprenants perdait le sens de la globalité de leur activité et ne construisaient par les compétences interdisciplinaires nécessaires à l'intégration de l'ensemble de leurs apprentissages. De façon contre intuitive, les approches globales ont montré de meilleures performances en particulier dans le transfert des acquis. Même si la complexité d'une situation d'apprentissage peut poser des difficultés de traitement par le système cognitif, les environnements complexes semblent être de bons candidats pour obtenir des performances

d'apprentissage intéressantes.

4- Les effets de l'isolement des éléments en interaction et du séquençement de la présentation

En situation d'apprentissage, le traitement d'un environnement complexe peut conduire à surcharger la mémoire de travail et empêcher la construction de nouvelles connaissances ou encore à créer un effet de démotivation qui se traduira par une perte d'engagement dans la tâche (et ne plus allouer suffisamment de ressources pour traiter les informations).

Pour apporter des solutions, la théorie de la charge cognitive propose de limiter la charge cognitive inutile et de manipuler la charge cognitive intrinsèque afin de garder des ressources pour la charge cognitive pertinente.

La manipulation de la charge cognitive intrinsèque consiste à réduire temporairement la complexité du contenu à apprendre en organisant une progression de l'apprentissage en plusieurs étapes. Le séquençement de l'apprentissage peut se réaliser sous plusieurs formes : le préapprentissage, la présentation des apprentissages sous forme modulaire, l'utilisation de sous-buts ou encore l'isolement des éléments d'information fortement interactifs. Ces stratégies sont fondées sur des scénarios à deux étapes. Nous présentons ici ces différentes stratégies mais dans le cadre de cette thèse, nous allons plus particulièrement nous intéresser à l'isolement des éléments d'information fortement interactif.

4-1 Le pré-apprentissage

Le principe du pré-apprentissage permet d'acquérir des connaissances en amont d'une situation d'apprentissage qui mobilise des contenus complexes. Cette stratégie permet de procéder à des traitements préalables qui, dans la situation d'apprentissage proprement dite pourraient mettre le système cognitif en surcharge (Clark & Mayer, 2003). Cette stratégie est fondée sur une démarche d'apprentissage en deux étapes. Dans une première étape, les différentes composantes importantes du système dynamique à étudier sont présentées aux apprenants. Chaque composante du système est considérée comme une unité qui porte un nom et qui peut se trouver dans des états différents. Dans la deuxième étape, un modèle causal de l'ensemble du système est présenté, c'est-à-dire une chaîne de relations de cause à effet entre toutes les composantes. Au cours de la première étape, chaque partie est présentée de façon statique, avec un commentaire verbal : l'enjeu est d'identifier les différents états possibles des composants. Dans la deuxième étape, le système est présenté dans son ensemble de façon dynamique, l'enjeu est de traiter les relations entre les différentes composantes afin de faciliter

l'étude du fonctionnement du système. Dans leurs deux premières expériences, Mayer, Mathias et Wetzell (2002) ont proposé l'étude d'un système mécanique de freinage pour automobile. Une présentation en deux étapes est comparée à une présentation où seule la seconde étape est exposée. Les résultats montrent que le préapprentissage entraîne de meilleures performances dans les épreuves de rappel et de transfert. Ces deux premières expériences pouvaient être critiquées, car les apprenants qui réalisent un préapprentissage passent plus de temps à apprendre. Pour répondre à cela, les auteurs ont réalisé une troisième expérience avec un « post apprentissage » (identique à celui proposé dans les deux premières expériences mais placé après la présentation du système complet dynamique). Là encore, les résultats ont montré que les apprenants qui ont reçu l'entraînement avant l'apprentissage ont obtenu de meilleurs résultats (le système technique étudié dans cette troisième expérience était une pompe à vélo). Cet effet de préapprentissage a été répliqué par Mayer, Mautone, et Prothero (2002) dans le domaine de la géologie et par Clarke, Ayres et Sweller (2005) dans le domaine des mathématiques. Cette dernière étude était fondée sur l'utilisation d'un tableur pour traiter des équations linéaires. Deux modalités d'apprentissage ont été comparées. Une première modalité qui proposait d'abord une séquence pour apprendre à utiliser le tableur puis dans un second temps, le traitement des problèmes de mathématiques. Une deuxième modalité qui présentait les fonctionnalités du tableur au moment des traitements des problèmes mathématiques. Les résultats ont bien montré qu'un séquençement de l'apprentissage est profitable aux apprenants qui n'avaient pas ou peu de connaissances sur l'utilisation des tableurs mais elle a mis en évidence le phénomène du renversement de l'expertise (Kalyuga, Ayres, Chandler et Sweller, 2003). Pour les apprenants experts dans l'utilisation des tableurs, le pré-apprentissage ne leur est pas favorable car la différence de scores en résolution des problèmes mathématiques n'était pas significative alors qu'une mesure auto rapportée de l'effort cognitif indiquait un score moyen plus important. Cette stratégie est donc dépendante du niveau d'expertise des apprenants.

4-2 La présentation des problèmes sous forme modulaire

Cette stratégie a pour but de réduire la difficulté d'apprentissage en isolant des modules qui peuvent être compris indépendamment les uns des autres et qui peuvent être transférés dans le contexte global de la situation problème. Gerjets, Scheiter et Catrambone (2006) présentent un exemple de format d'apprentissage modulaire et celui d'un apprentissage molaire à partir d'une résolution de problème dans le champ des probabilités. Le problème est le suivant :

« Aux jeux olympiques, 7 athlètes participent à la course du 100 m. Quelle est la probabilité de donner le nom du médaillé d'or, du médaillé d'argent et celui du médaillé de bronze ? »

Une résolution avec un format molaire donne :

1- Identification des caractéristiques du problème

C'est un problème d'arrangements sans répétition : l'ordre de la sélection est important et il n'y a pas de remplacement de l'élément sélectionné.

2- Identification de la formule adéquate

Le nombre d'arrangements sans répétition de n éléments pris k à k est égal à :

3- Application de la formule

Il y a 7 coureurs et les arrangements sont réalisés avec 3 coureurs donc n est égal à 7 et k est égal à 3.

Le calcul donne $7! / (7-3)! soit 1/210$.

4- Calcul de la probabilité

*Il n'y a qu'une seule combinaison qui donne les noms dans le bon ordre sur les 210 possibles donc **p est égal à 1/210***

Une résolution avec un format modulaire donne :

1- Calcul de la probabilité de donner le nom du médaillé d'or :

Un seul sera le médaillé d'or parmi les 7 coureurs, la probabilité de faire le bon choix est de $1/7$

2- Calcul de la probabilité de donner le nom du médaillé d'argent :

Parmi les 6 coureurs restants, un seul sera le médaillé d'argent, la probabilité de faire le bon choix est de $1/6$

3- Calcul de la probabilité de donner le nom du médaillé de bronze :

Parmi les 5 coureurs restants, un seul sera le médaillé de bronze, la probabilité de faire le bon choix est de $1/5$

4- La probabilité d'obtenir le bon ordre est de

$1/6 \times 1/7 \times 1/8$ soit **$p = 1/210$**

Avec ce dernier format, les 3 premiers pas de la résolution font apparaître des modules de calcul semblables et reproductibles qui s'appuient sur une représentation très simple de la situation problème (1 parmi les 7 coureurs sera le gagnant, 1 parmi les 6 restants, ...) et le calcul final de la probabilité revient à calculer le produit des probabilités partielles.

Dans deux expériences portant sur des problèmes similaires, ces auteurs ont montré que les meilleures performances ont été obtenues grâce à l'apprentissage modulaire par rapport à l'approche molaire où l'information est fournie totalement intégrée. Avec cette stratégie, l'apprentissage est plus rapide et conduit à de meilleures performances en transfert, et ceci quelles que soient les connaissances préalables des apprenants. Il est à noter que cette stratégie a été expérimentée plutôt dans le domaine des traitements mathématiques des probabilités. Des répliques dans les domaines des apprentissages techniques seraient probablement intéressantes.

4-3 L'utilisation de sous-buts

De nombreux auteurs (Anderson, Farrell, & Sauer, 1984 ; Gick & Holyoak, 1983; Reed, Dempster, & Ettinger, 1985; Spencer & Weisberg, 1986) cités par Catrambone (1998) ont observé que les élèves ont de grandes difficultés pour résoudre de nouveaux problèmes si ces derniers sont différents de ceux qu'ils ont eu comme exemple au cours de leur formation. Très souvent, les élèves apprennent le scénario de résolution appris à partir des problèmes traités lors de l'apprentissage et tente de le répliquer pas à pas dans la nouvelle situation. Avec cette stratégie, le transfert des apprentissages n'est pas performant et conduit très souvent à l'échec.

Pour améliorer le transfert des apprentissages, Catrambone (1998) a montré que les apprenants peuvent améliorer leurs performances si les problèmes qu'on leur pose sont structurés en sous-buts qui permettent d'échafauder la résolution globale. Les sous-buts ne sont pas de simples pas de résolution, ils représentent des entités adaptables à nouveaux problèmes. Catrambone (1998) précise qu'un sous but peut prendre deux formes :

- soit une entité générée par l'apprenant qui, au cours de la résolution d'un problème, se trouve dans une impasse ;
- une caractéristique de la structure d'une tâche qui peut être enseignée à un apprenant.

Day et Goldstone (2012) soulignent que l'utilisation de sous-buts est un moyen simple de mettre l'accent sur les caractéristiques structurelles d'une résolution de problème complexe à travers des marquages explicites et ainsi transférer la solution la plus efficace. Ces travaux

ont été menés chez des enfants (Loewenstein & Gentner, 2005) et chez les adultes (Son, Doumas & Goldstone, 2010).

4-4 L'effet d'isolement des éléments fortement interactifs

Un système technique est un ensemble d'éléments qui interagissent entre eux suivant des principes ou des règles prédéfinies par le concepteur pour obtenir une fonction d'usage. Un système est défini par la nature de ses éléments constitutifs, les interactions entre eux et sa frontière avec son environnement. Quand il y a une forte interaction entre les éléments entre eux et avec l'environnement, la mémoire de travail peut se trouver en surcharge et s'il est nécessaire de traiter tous les éléments simultanément pour comprendre le fonctionnement global du système, le but d'apprentissage sera difficilement atteint. En revanche, si les éléments constitutifs du système étudié ont de faibles interactions entre eux et avec leur environnement, l'apprentissage sera facilité car ces éléments pourront être traités de façon isolée afin de créer des connaissances facilement réutilisables et accéder à la compréhension du système global. L'effet de l'interaction entre les éléments sur l'apprentissage est largement soutenu empiriquement (voir Marcus, Cooper & Sweller, 1996 ; Leahy & Sweller, 2005 ; Sweller & Chandler, 1994). Sweller, Ayres et Kalyuga (2011) affirment par ailleurs que les effets de charge cognitive les plus importants se produisent lorsque la charge cognitive intrinsèque est élevée.

En réponse, les chercheurs ont identifié une stratégie de réduction de la charge cognitive intrinsèque en décomposant la présentation du support de l'apprentissage en deux étapes. Avec cette stratégie, les éléments d'une structure complexe sont d'abord présentés isolément, avant de les présenter en interaction complète (voir Ayres, 2006 ; Blayney, Kalyuga & Sweller, 2010 ; Pollock, Chandler & Sweller, 2002). Dans cette dernière publication, les auteurs ont testé cette stratégie sur un apprentissage autour de la mesure d'isolement et de continuité du circuit électrique d'une bouilloire électrique. Cette stratégie est connue sous le nom d'effet d'isolement des éléments (Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011), elle n'a pas pour l'instant fait l'objet de nombreuses études. Pour tester leurs hypothèses, Pollock, Chandler et Sweller (2002) ont mis en concurrence deux types de présentation des informations. Une première version qui se caractérise par une liste d'actions à réaliser sans explications particulières et une deuxième version qui reprend la liste précédente mais donne, pour chaque item, des explications complémentaires en relation avec la finalité de la tâche attendue. Ils ont manipulé le degré d'expertise des apprenants et le format des connaissances à apprendre (savoir faire *vs* conceptualisation). Ces travaux ont montré que la présentation des

informations sans explications complémentaires, c'est-à-dire de façon isolée, donnait de meilleurs résultats pour les participants qui n'avaient pas de connaissances préalables dans le domaine de la mesure électrique et que pour des experts, la présentation avec les éléments isolés n'était pas nécessaire. Ces travaux appellent deux remarques :

- entre les deux modalités, la quantité d'information n'est pas équivalente. En effet, la deuxième version est construite à partir de la première version en y ajoutant des informations complémentaires qui apportent de l'interaction ;
- il est question d'interaction mais la notion d'interactivité n'est pas clairement identifiée. (les interactions ont-elles lieu entre les éléments et/ou entre les éléments et le tout ?).

Cet effet de l'isolement des éléments a aussi été étudié dans le domaine du calcul algébrique en mathématiques (Ayres, 2006). Cette expérience a comparé trois stratégies de résolution de problèmes. La version « éléments isolés » était fondée sur une stratégie qui consistait à résoudre les problèmes algébriques à partir de calculs partiels, La version « intégrée » était fondée sur une stratégie qui consistait à résoudre les problèmes avec une approche classique (sans passer par des calculs partiels). Une troisième version dite « mixte » a été testée. Ces travaux ont bien montré l'effet de renversement de l'expertise (Kalyuga, Ayres & Sweller, J., 2003), les participants experts ont obtenu de meilleures performances dans la condition « intégrée » que dans la condition « éléments isolés ». Par ailleurs, les résultats obtenus (mais non significatifs) par les non-experts tendaient à montrer qu'ils étaient meilleurs dans la condition « éléments isolés ». Dans sa conclusion, l'auteur souligne que cette étude était limitée par le petit nombre de participants, le fait qu'elle était réalisée dans le domaine particulier des mathématiques et par les choix fait sur la construction du matériel expérimental. En particulier, dans les problèmes posés, l'isolation des éléments était simplifiée du fait du caractère séquentiel de la résolution des problèmes algébriques. Ce dernier aspect est un des points d'entrée dans les travaux présentés dans cette thèse.

La décomposition d'une structure complexe en ses éléments constitutifs pose le problème du niveau de granularité du découpage et du degré d'isolement des éléments. Pour le niveau de granularité, le découpage peut se faire par une extraction des unités significatives de la structure de la complexité (pour un système technique, nous pouvons par exemple proposer un découpage par unités fonctionnelles). En ce qui concerne le degré d'isolement, les éléments peuvent être présentés avec leurs interactions ou sans leurs interactions avec les autres éléments et avec le système.

5- Conclusion du chapitre 4

La théorie de la charge cognitive soutient qu'une présentation allant du simple vers le complexe donne de meilleurs résultats d'apprentissage mais certains auteurs soutiennent qu'une stratégie allant du complexe vers le simple semble mieux adaptée aux apprentissages pour le transfert des connaissances.

Les théories à notre disposition nous montrent que si ce qui est présenté aux apprenants est trop complexe, ils risquent d'être en surcharge cognitive (théorie de la charge cognitive), mais que si ce qui leur est présenté n'est pas assez complexe, il risque de ne pas consacrer suffisamment d'attention ou même ne pas s'engager dans la tâche d'apprentissage (théorie des *Désirable Difficulties*).

Le séquençement de la présentation du matériel d'apprentissage est une réponse pour en diminuer temporairement la complexité. La décomposition de la complexité nous conduit à avoir à notre disposition deux jeux d'informations issus du système complexe : un jeu qui contient la complexité authentique de la réalité et un jeu bâti autour d'éléments issus de cette complexité.

Partie II

Contribution empirique

Introduction

1- Objectifs et hypothèses générales

1-1 Objectifs de la contribution empirique

Jusqu'à présent, les travaux de recherches ont montré qu'il est pertinent de proposer aux apprenants des scénarios d'apprentissage fondés sur une présentation en deux étapes du matériel à apprendre. Un matériel d'apprentissage est composé d'un ensemble plus ou moins important d'éléments en interactions constituant un tout. Pour mettre en œuvre cette stratégie, le concepteur d'une séquence pédagogique doit prévoir deux types de présentation : une présentation du tout et une présentation des éléments constitutifs du tout. Pour le deuxième type de présentation, il est confronté au problème de l'isolement des éléments vis à vis du tout.

Par ailleurs, van Merriënboer, Kester et Paas (2006) soutiennent qu'un séquençement qui va du tout vers les parties devrait donner de meilleures performances pour le transfert des connaissances mais ils n'ont pas vérifié leur hypothèse empiriquement. Cette prédiction n'est pas en accord avec la théorie de la charge cognitive qui soutient que dans le cas de l'effet des éléments interactifs présentés isolément, l'apprentissage est plus performant en isolant les éléments avant de présenter le système complexe (Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011).

L'objectif de cette contribution empirique est de tenter d'apporter des compléments aux travaux de recherche déjà réalisés sur l'effet des éléments interactifs présentés isolément. Pour cela, nous allons tenter de répondre aux questions suivantes :

- Est-ce que le séquençement qui va des parties vers le tout est toujours le plus pertinent ?

- Le degré d'isolement des éléments a-t-il une influence sur la pertinence du matériel d'apprentissage ?

Pour tenter de répondre à ces questions, quatre expérimentations ont été menées pour tester le degré de l'isolement des éléments en interaction et le sens de progression du séquençement de la présentation. Au cours de ces différentes expériences, nous allons manipuler le degré de complexité des contenus à apprendre (de peu complexe à très complexe) ainsi que le degré d'isolement des parties du tout (totalement isolé et partiellement isolé).

1-2 Hypothèses générales

En accord avec la théorie de la charge cognitive, nous émettons les trois hypothèses suivantes :

- première hypothèse : la présentation des parties vers le tout donne de meilleures performances d'apprentissage qu'une approche du tout vers les parties, quel que soit le degré de complexité du matériel à apprendre
- deuxième hypothèse : l'isolation totale des éléments donne de meilleurs résultats d'apprentissage, quel que soit le degré de complexité du matériel à apprendre ;
- troisième hypothèse : la présentation des parties vers le tout avec les parties en totale isolation est plus performante quand le matériel à apprendre est très complexe.

2- Définition du degré de complexité des contenus à apprendre

Nous rappelons que la complexité d'un environnement informatif est caractérisée par les deux grandeurs suivantes (Sweller, 1994) :

- le nombre d'éléments en présence ;
- le nombre et le type d'interactions qui existent entre les éléments.

Un contenu à apprendre peu complexe est composé d'un petit nombre d'éléments indépendants reliés par des relations simples. Par opposition, un contenu à apprendre très complexe est composé d'un grand nombre d'éléments reliés par des relations de nature complexe (des relations de cause à effet, des relations mathématiques non linéaires, des relations contextuelles, ...).

Dans le déroulement des expérimentations présentées dans les chapitres suivants, nous allons progressivement augmenter la complexité du matériel à apprendre de peu complexe pour la première expérimentation, moyennement complexe pour la seconde à très complexe

pour les deux dernières.

3- Définition du degré d'isolement des parties du tout

Deux types d'isolement des éléments en interaction sont possibles. Soit un isolement partiel, soit un isolement total. Pour isoler les parties d'un tout composé d'éléments en interaction (fig 18), une simple extraction par découpage des éléments donne des éléments partiellement isolés du tout (fig 19).

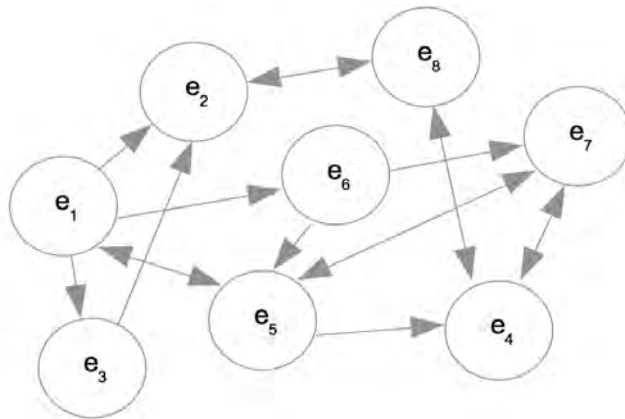


Fig 18 : Composition d'un système complexe

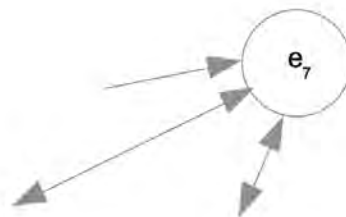


Fig 18 : Isolement de l'élément e_7 par simple extraction

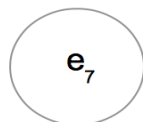


Fig 19 : Isolement total de l'élément e_7

Nous constatons dans ce cas que l'élément e_7 est partiellement isolé car il est présenté avec des indications sur la manière dont il interagit avec seulement une partie des autres

éléments.

Pour obtenir l'isolement total d'un élément, il faut l'extraire de son contexte et supprimer toute référence à ses relations avec les autres éléments (fig 19). Dans ce cas, nous voyons que l'élément est présenté seul indépendamment du contexte dans lequel il est placé.

4- Scénario des expérimentations présentées

Les quatre études se sont déroulées selon le même scénario : une phase de prétest, un apprentissage et un post-test. Pour les deux dernières études, l'effort mental consenti pour étudier le matériel a été mesuré à l'aide d'une échelle auto-rapportée. Les expérimentations se déroulaient durant le temps scolaire avec l'autorisation du chef d'établissement et avec l'accord des élèves. Ils étaient informés qu'ils allaient participer à une expérimentation menée dans le cadre d'une recherche sur les apprentissages à l'école par un laboratoire de l'Université de Toulouse. J'étais le seul expérimentateur et j'avais la maîtrise de toutes les phases de l'expérimentation (étude et réalisation du matériel expérimental, consignes aux participants).

Le pré-test permettait d'évaluer le niveau des participants dans le domaine étudié. Il était composé de questions de connaissances et de compréhension sur les éléments pris de façon isolée, sur les éléments avec des interactions avec d'autres éléments et sur le système complet. Il se présentait sous la forme d'un QCM avec à chaque fois la possibilité de répondre « je ne sais pas ». Les participants répondaient au prétest une semaine avant la séquence d'apprentissage, ils ne connaissaient pas leurs scores. La consigne était la suivante :

« Je vous propose aujourd'hui de répondre aux questions posées dans le test que je vais vous remettre dans un instant. Vous pouvez encore refuser de participer à cette expérimentation. Si vous ne connaissez pas la réponse, cochez la case 'Je ne sais pas'. Je vous remercie pour votre engagement dans cette expérience »

La phase d'apprentissage était réalisée à partir d'un environnement multimédia présentant des planches composées de textes et de graphiques. Dans chacune des quatre expérimentations, la quantité d'information à traiter était égale dans chaque version du matériel, les parties et le tout étaient identiques, seul l'ordre du séquençement était différent. Le scénario était imposé de façon logicielle et ne demandait donc pas une surveillance de la progression des participants. Pour comparer cette stratégie d'apprentissage en deux étapes à une stratégie classique, nous avons mis en place, pour les trois dernières expérimentations, un groupe contrôle qui devait étudier seulement le tout. Pour bénéficier d'un temps d'étude

comparable à celui mis par les deux autres groupes expérimentaux, ce groupe devait étudier deux fois le tout. Les participants étaient des répartis dans une salle informatique assez spacieuse pour éviter les discussions et favoriser l'attention sur l'étude proposée. La consigne était la suivante :

« Je vous propose aujourd'hui d'étudier un cours sur le sujet sur lequel vous avez été testé la semaine dernière. Vous pouvez encore refuser de participer à cette expérimentation. Vous devez étudier attentivement chaque planche en la lisant plusieurs fois si nécessaire. A la fin de l'étude d'une planche, vous pouvez passer à la planche suivante en cliquant sur la flèche située en bas à droite du document. Quand vous aurez fini, vous resterez devant l'ordinateur en attendant les consignes suivantes. Je vous remercie encore pour votre engagement dans cette expérience. »

Le post-test était réalisé suite à la phase d'apprentissage après un temps de repos de cinq minutes puis la réalisation d'une suite d'opérations arithmétiques pour s'affranchir de l'effet de récence. Le post-test permettait d'évaluer les performances des participants suite à la phase d'apprentissage. Il était composé des mêmes questions de connaissances et de compréhension qu'au prétest sur les éléments pris de façon isolée, sur les éléments avec des interactions avec d'autres éléments et sur le système complet puis, pour les expériences 2 et 4 sur des questions de transfert à d'autres technologies. Il se présentait sous la forme d'un QCM avec à chaque fois la possibilité de répondre « je ne sais pas ». La consigne était la suivante :

« Je vous propose maintenant de répondre aux questions posées dans le test que je vais vous remettre dans un instant. Vous pouvez encore refuser de participer à cette expérimentation. Si vous ne connaissez pas la réponse, cochez la case 'Je ne sais pas'. Je vous remercie pour votre engagement dans cette expérience ».

Les questions de rappel des connaissances correspondaient strictement à ce qui était écrit dans le matériel d'apprentissage. Les questions de compréhension mobilisaient les connaissances des participants pour les réinvestir dans la résolution d'un problème issu du contexte support de l'apprentissage. Enfin, le transfert mobilisait les connaissances apprises pour résoudre un problème dans un contexte différent du support d'apprentissage.

Chapitre 5

Expérimentation 1. Apprentissage en deux étapes : Effet de l'ordre de présentation dans un environnement peu complexe²

1- Objectif et hypothèses

L'objectif de cette première expérience était de tester l'effet de l'ordre de présentation des parties vers le tout et du tout vers les parties d'un matériel d'apprentissage fondé sur une approche en deux étapes. La notion de complexité d'un matériel d'apprentissage ne nous était pas encore très claire et nous avons choisi d'expérimenter l'étude d'un tout composé d'éléments sans interactions et un nombre restreint de planches à étudier (8 planches).

En accord avec la théorie de la charge cognitive, nous avons émis l'hypothèse que la présentation des parties vers le tout donnerait de meilleures performances d'apprentissage qu'une approche du tout vers les parties.

2- Contexte technique et scientifique du support

Le contexte technique et scientifique du support de l'expérience est l'enregistrement audionumérique. C'est une technologie qui permet de stocker et de traiter des œuvres sonores pour être ensuite écoutées localement ou transmises via un réseau informatique (ex : internet). Cette technologie est enseignée en génie électrique dans la partie électronique et plus spécifiquement en traitement du signal et de l'information. Les principaux intérêts de cette technologie sont, d'une part la densité des informations qu'il est possible d'atteindre dans les supports numériques de stockage (ex : disques durs, clés USB) et d'autre part, les possibilités de traitement par l'intermédiaire de calculateurs numériques (ex : compression MP3, analyse de la signature sonore).

² Bellec, D. & Tricot, A. (2012). From isolated interacting elements effect to part-whole effect? *5th International Cognitive Load Theory Conference*, Thallahassee, 9-11 April.

L'œuvre sonore originale est supportée par un signal analogique qui évolue continument en fonction du temps (fig 20). Pour obtenir un fichier numérique à partir de l'œuvre originale, il est nécessaire de commencer par une étape d'échantillonnage (fig 20a) puis affecter aux échantillons prélevés une grandeur numérique (étape de quantification) représentative de l'amplitude de l'échantillon prélevé (fig 20b).

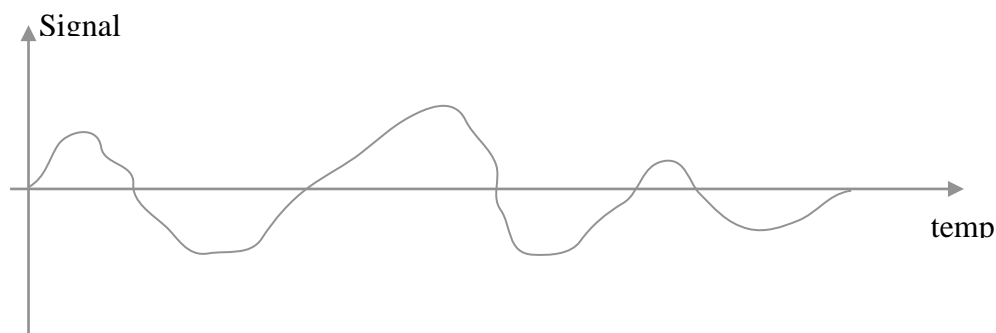


Figure 20 : signal

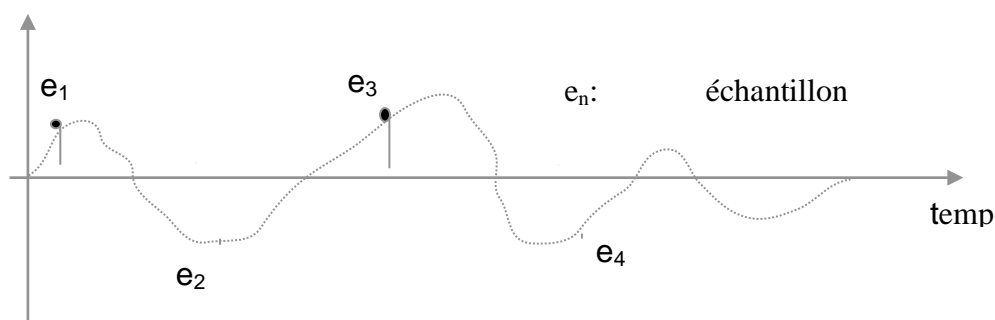


Figure 20a : Etape d'échantillonnage

e	→	1 1 0 0 1 0 1 1 0 1 1 0 1 1 0 1
e	→	0 1 1 1 1 0 0 1 0 1 1 0 0 1 0 0
e	→	1 0 1 1 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 1
e	→	0 1 1 1 1 0 1 1 0 0 1 0 1 1 1 1

Figure 20b : Etape de quantification

Dans ce type d'application, la problématique générale revient à choisir une fréquence d'échantillonnage la plus faible possible (la limite basse est fixée par le théorème de Shannon) et une quantification adaptée pour obtenir des tailles de fichiers les plus faibles possibles tout en maîtrisant le niveau de qualité des enregistrements obtenus. Selon les critères admis par la profession, les enregistrements peuvent être de basse qualité que l'on trouve dans les jouets bon marché pour enfants, de moyenne qualité pour des applications standards et de haute

qualité pour des applications haute fidélité.

L'enregistrement numérique de la musique engendre des interactions entre quatre variables (le temps d'enregistrement Tr , la fréquence d'échantillonnage Fe , le taux de quantification Q et le nombre de canaux Nc).

La qualité d'un enregistrement numérique dépend de l'interaction entre 3 variables. Un enregistrement de haute qualité implique une grande fréquence d'échantillonnage, un fort taux de quantification et un nombre suffisant de canaux. Si une des variables est dégradée, la qualité de l'enregistrement se trouve dégradée.

La taille des fichiers est donnée par le nombre de bits (noté : $Nbits$) nécessaire pour stocker un enregistrement. Pour calculer la valeur de $Nbits$, il faut appliquer la relation suivante :

$$Nbits = Fe \times Q \times Nc \times Tr$$

3- Méthode

3-1 Participants

33 élèves du Lycée d'Enseignement Général et Technologique Louis Armand de Poitiers (France) ont participé à cette expérience (âge moyen : 17,8 ans). Ils étaient scolarisés en première STI génie électrotechnique. Ils étaient volontaires pour participer à cette expérience et ils n'avaient reçu aucune formation au préalable dans le domaine du traitement du signal audionumérique. Les élèves étaient informés que les résultats de cette expérimentation étaient confidentiels et n'avaient donc aucune conséquence sur leur moyenne scolaire.

3-2 Matériel d'apprentissage

Deux versions d'un support multimédia ont été élaborées à propos de l'enregistrement numérique de la musique. Les deux versions contenaient les mêmes informations, seul l'ordre de présentation des informations était différent.

Le matériel d'apprentissage était composé de deux jeux de diapositives (jeu A et jeu B), présenté en annexe 1.

Le jeu A était composé de cinq planches :

- planche A1 : définition d'un enregistrement numérique ;
- planche A2 : définition de la fréquence d'échantillonnage Fe ;

- planche A3 : définition du taux de quantification Q ;
- planche A4 : définition du nombre de canaux N_c ;
- planche A5 : définition du temps d'un enregistrement Tr .

Le jeu B était composé de trois planches :

- planche B1 : présentation des avantages de l'enregistrement numérique ;
- planche B2 : définition de la qualité d'un enregistrement numérique, qui résulte de l'interaction entre trois variables (Fe , Q , N_c) ;
- planche B3 : définition de la taille d'un fichier d'enregistrement, qui résulte de l'interaction entre quatre variables (Fe , Q , N_c , Tr).

Le jeu A correspondait à une présentation des éléments en isolation totale (les parties). Chaque planche était construite autour d'une représentation graphique et d'un texte pour expliquer les définitions. Le jeu A présentait les définitions des différentes grandeurs du signal sans faire référence au contexte de l'audio numérique et sans interactions avec les autres grandeurs présentées.

Le jeu B correspondait à la présentation de l'ensemble des variables en interaction (le tout), chaque planche était construite autour d'une représentation graphique et d'un texte pour expliquer les définitions.

Dans les deux cas, il n'était pas possible de passer d'un jeu à l'autre durant l'étude et il n'était pas possible de revenir en arrière dans le déroulement de l'étude.

Le niveau de complexité était considéré comme faible car seulement 4 éléments isolés étaient présents. Les interactions entre les éléments étaient des opérations de multiplications arithmétiques entre 4 éléments pour le calcul de la taille des fichiers et des combinaisons entre trois variables pour l'évaluation de la qualité des enregistrements.

3-3 Procédure expérimentale

Après avoir répondu au pré-test une semaine auparavant, les élèves ont été répartis, de façon aléatoire, dans deux groupes expérimentaux. Les ordinateurs étaient configurés pour l'une ou l'autre des versions. En entrant dans la salle, les élèves tiraient au sort un numéro de poste et s'y rendaient, s'y installaient et attendaient la consigne avant de se lancer dans l'étude qui leur

était proposée. Chaque groupe expérimental correspondait à un ordre de présentation soit « des parties vers le tout » (jeu A puis jeu B) ou bien « du tout vers les parties » (jeu B puis jeu A). A la suite de l'étude, les élèves devaient répondre à un post-test.

3-3-1 Pré-test

Le pré-test était composé de 20 questions (voir annexe 1). Elles permettaient de vérifier l'état des connaissances des élèves sur les définitions des différentes composantes individuelles qui permettent d'évaluer la qualité d'un enregistrement audio, sur les combinaisons qui permettent d'avoir des enregistrements de basse, de moyenne et de haute qualité puis de faire le calcul de la taille du fichier informatique associé.

Pour la qualité des fichiers, les réponses attendues étaient en relation avec les standards professionnels, soit trois niveaux : haute qualité, qualité moyenne et basse qualité.

Pour le calcul de la taille des fichiers, afin de ne pas perturber les élèves avec l'utilisation d'une calculatrice (introduction d'une charge cognitive inutile) plusieurs combinaisons étaient présentées sous la forme d'un QCM (figure 21).

Un point était accordé pour chaque bonne réponse, zéro point pour une réponse erronée ou pas de réponse. Le temps de passation était libre.

3-3-2 Phase d'étude

En attendant la consigne, les élèves étaient face à un écran neutre qui leur indiquait qu'ils participaient à une étude sur les apprentissages à l'école. Ils n'avaient pas de quoi écrire ni de quoi calculer. Après avoir reçu la consigne, ils commençaient l'étude du matériel d'apprentissage dans le silence. A la fin de l'étude, ils restaient devant l'ordinateur en attendant que tous les participants aient fini.

3-3-3 Post-test

Le post-test permettait de mesurer l'état des connaissances des élèves après la session d'apprentissage. Entre la fin de la session d'apprentissage et le début du post-test, une pause d'une durée de 5 minutes en silence devant l'ordinateur puis une suite d'opérations arithmétiques était donnée aux élèves pour s'affranchir de l'effet de récence.

Les questions posées étaient les mêmes que pour le pré-test.

Un point était accordé pour chaque bonne réponse, zéro point pour une réponse erronée ou pas de réponse. Le temps de passation était libre.

On souhaite enregistrer une séquence musicale avec les paramètres :

Fréquence d'échantillonnage : 22 kHz

Nombre de bits de quantification : 16 bits

Stéréo : oui

Durée : 1 seconde

Pour calculer l'espace de stockage nécessaire, Il faut faire l'opération suivante :

☐ 22000 x 16 x 2

☐ 22 x 1 x 3600

☐ 22000 x 16 x 1

☐ 22000 x 2 x 1

☐ Je ne sais pas

Figure 21 : Un exemple de question où les participants n'ont pas besoin de calculatrice pour répondre

3-3-4 Variables indépendantes et dépendantes

Dans cette expérience, nous avons une variable ordre de présentation, notée *OP* indépendante à deux modalités pour l'ordre de présentation des informations :

OP: {des parties vers le tout ; du tout vers les parties}

et une variable dépendante *SC* calculée à partir d'un score relatif obtenu par la relation suivante :

$$SC = \frac{\text{Nombre de bonnes réponses}}{\text{Nombre total de questions}}$$

4- Résultats

Les scores relatifs (variable dépendante *SC*) ont été calculés pour le pré-test et pour le post-test en appliquant la relation suivante :

Le tableau 2 présente, pour chaque groupe expérimental, la moyenne et l'écart type des scores relatifs au pré-test puis au post-test.

	Pré-test	Post-test
a) Les parties avant le tout (n = 17)	0,15 (0,09)	0,64 (0,22)
b) Le tout avant les parties (n = 16)	0,15 (0,08)	0,63 (0,24)

Tableau 2. Taux moyen de bonnes réponses (écart type) pour l'expérience 1

Le calcul du *t* de Student montre qu'il n'y a pas de différences significatives entre les deux groupes sur le pré-test ($t(32) = 0,15$; $p > 0,8$). Ceci indique que les participants appartenant aux deux groupes n'étaient pas différents au plan de leurs connaissances préalables dans le domaine du traitement du signal audionumérique.

Il n'y avait pas de différences non plus entre les deux groupes à l'issue du post-test ($t(32) = 0,14$; $p > 0,8$). Ce résultat montre que l'ordre de présentation n'a pas eu d'effet sur les performances d'apprentissage.

Les deux groupes ont bénéficié d'un fort gain d'apprentissage entre le pré-test et le post-test. La différence entre le pré-test et le post-test est significative dans les deux conditions : $t(16) = -8,72$; $p < 0,01$ pour le groupe « des parties vers le tout », $t(15) = -8,10$; $p < 0,001$ pour le groupe « du tout vers les parties ».

5- Discussion

Avec cette première expérience, nous avons obtenu un effet d'apprentissage important mais aucune différence significative entre les deux conditions de présentation « des parties vers le tout » et « du tout vers les parties ». L'ordre de la présentation des informations ne semble donc pas important en ce qui concerne les performances d'apprentissage. Il est à noter que même si les apprentissages axés sur la compréhension des variables élémentaires et de leurs combinaisons pour évaluer la qualité des enregistrements et la taille des fichiers associés

semblaient complexes (quatre variables, trois interactions), la complexité était réduite par le fait que les trois interactions étaient de même nature : une simple multiplication. Le fort gain d'apprentissage obtenu dans chaque condition est probablement lié, en accord avec la théorie de la charge cognitive, au fait que la situation d'apprentissage ne demandait pas un effort très important.

Cette absence d'effet de l'ordre de présentation avec un matériel que nous avons supposé trop simple à apprendre, nous a conduit à expérimenter avec autre support d'apprentissage fondé sur un contenu plus complexe.

Chapitre 6

Expérimentation 2. Apprentissage en deux étapes :

Effet du degré d'isolement des éléments dans un environnement complexe³

1- Objectifs et hypothèses

Le premier objectif de cette deuxième expérience était de tester l'effet de l'ordre de présentation des parties vers le tout et du tout vers les parties d'un matériel d'apprentissage avec un matériel plus complexe que celui proposé dans l'expérimentation 1. Nous avons donc augmenté le nombre d'éléments, le nombre et la diversité d'interactions.

Le deuxième objectif était de tester l'effet du degré d'isolement des éléments en introduisant un troisième groupe expérimental qui devait apprendre à partir d'un scénario allant des parties vers le tout, les parties étant fondées sur la présentation des éléments en isolation partielle.

Avec ce matériel plus complexe et en accord avec la théorie de la charge cognitive, nous avons souhaité vérifier que la présentation des parties vers le tout donnerait de meilleures performances d'apprentissage. Nous avons souhaité aussi vérifier l'hypothèse que l'isolement total des éléments en interaction donnerait de meilleures performances d'apprentissage.

2- Contexte technique et scientifique du support

Le contexte technique et scientifique du support de l'expérience est la régulation de température. La régulation, dans le domaine des systèmes industriels, est une stratégie de

³ Bellec, D. & Tricot, A. (2010). The isolated interacting elements effect: isolated or single elements? *4th International Cognitive Load Theory Conference*, Hong Kong – Macao, November 22-25.

commande qui permet de maintenir une grandeur de sortie égale à une consigne constante malgré l'influence de grandeurs perturbatrices qui peuvent être internes au système mais aussi provenir de l'extérieur. Cette stratégie est fondée sur le principe de la comparaison entre la valeur de la grandeur de sortie (mesurée par un capteur) et une consigne. La comparaison de ces deux grandeurs génère une erreur qui permet d'agir sur le système pour maintenir la grandeur réglée constante (figure 22).

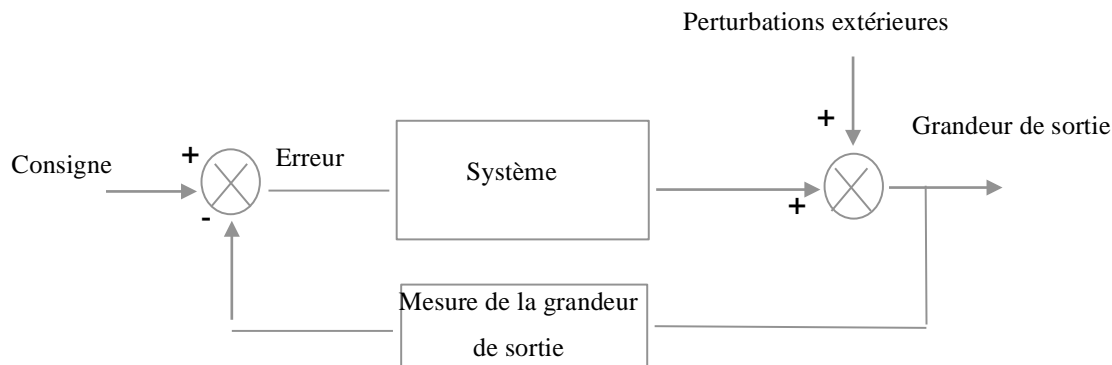


Figure 22 : Architecture générale d'un système régulé

La régulation est un enseignement dispensé dans tous les domaines des sciences de l'ingénieur. La régulation de température est une stratégie employée en génie électrique dans les procédés mobilisant des conversions électrothermiques.

Dans les enseignements technologiques, un système régulé est étudié à l'aide d'une stratégie « approche fonctionnelle, approche structurelle et approche comportementale ». L'étude de la régulation mobilise des connaissances générales sur la régulation mais aussi des connaissances spécifiques au domaine de l'application concerné.

3- Méthode

3-1 Participants

63 étudiants de trois établissements de Poitiers et Châtellerauld (France) ont participé à cette expérience (âge moyen : 19,5 ans). Ils étaient scolarisés en BTS Systèmes Electroniques, en BTS Electrotechnique, en IUT Mesures Physiques et en IUT Génie Thermique et Energie. Les étudiants ont participé volontairement à l'expérience. Ils n'avaient reçu aucune formation au préalable dans le domaine de la régulation de température. Les étudiants étaient informés que les résultats de cette expérimentation étaient confidentiels et n'avaient donc aucune conséquence

sur leur moyenne scolaire.

3-2 Matériel d'apprentissage

Les étudiants avaient à étudier le fonctionnement de la régulation de température d'un bain de traitement thermique, les différents composants mis en jeu et comment ils interagissaient entre eux pour assurer la fonction de maintien en température, malgré des perturbations pouvant survenir dans les caractéristiques internes au bain (changement de nature du produit à traiter) ou externes (variations de la température ambiante). L'ensemble du système est présenté en figure 23.

Par rapport à l'expérience 1, l'apprentissage était plus difficile car il mobilisait l'élaboration de connaissances sur le fonctionnement des composants (aspects énergétiques et informationnels), sur le traitement d'un signal d'erreur issu d'un calcul de différence entre une consigne de température et une mesure de la température réelle et enfin sur les notions de thermodynamique (mélange de produit de températures différentes et de quantités différentes).

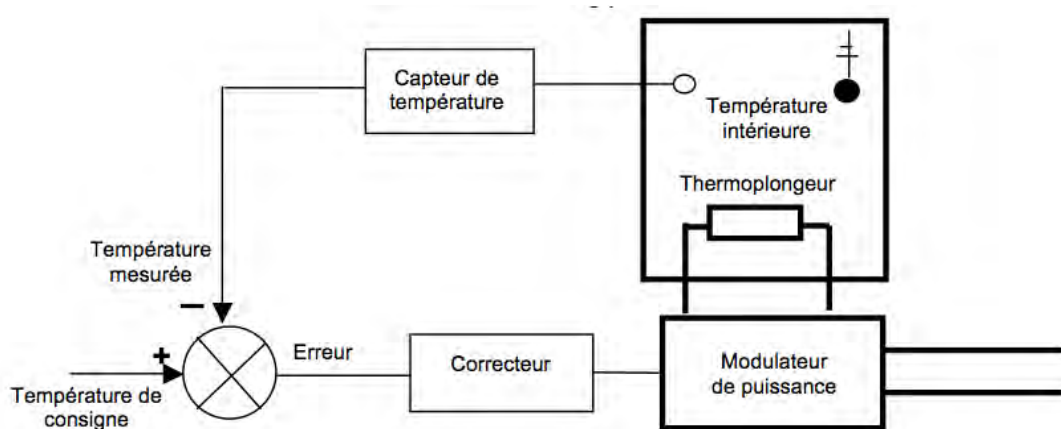


Figure 23 : Système de régulation thermique : le système complet.

Un support multimédia, sur le thème de la régulation de température, a été développé pour réaliser cette expérience. Ce support comportait six planches composées de textes et de schémas. Le nombre de planches était volontairement réduit car la complexité du matériel à apprendre était induite par le nombre d'éléments, le nombre et la diversité des interactions.

Le matériel d'apprentissage était composé de trois jeux de diapositives (jeu A, jeu B et

jeu C), dont quelques planches sont données en annexes 2.

Le jeu A était composé de quatre planches :

- planche A1 : Réglage de la température d'un réservoir de liquide à l'aide d'un modulateur de puissance ;
- planche A2 : Présentation du fonctionnement d'un thermomètre électronique ;
- planche A3 : Présentation du fonctionnement d'un comparateur ;
- planche A4 : Présentation du fonctionnement d'un correcteur Tout Ou Rien ;

Le jeu B était composé de quatre planches :

- planche B1 : Réglage de la température d'un réservoir de liquide à l'aide d'un modulateur de puissance ;
- planche B2 : Mesure de la température du bain ;
- planche B3 : Détection de la différence entre la température de consigne et la température du bain ;
- planche B4 : Stratégie de commande de la puissance de chauffe en fonction de la différence entre la consigne et la température réelle du bain ;

Le jeu C était composé de deux planches :

- planche C1 : Présentation d'une solution technique pour assurer la régulation automatique de la température d'un bain pour traitements thermiques ;
- planche C2 : Fonctionnement d'un système régulé en température.

Les jeux A et B correspondaient à une présentation des éléments (les parties). Le jeu A présentait le fonctionnement des différents éléments du système global avec les interactions avec le système global (voir un exemple figure 24). Le jeu B présentait le fonctionnement des différents éléments du système global sans interactions avec les autres éléments (voir un exemple figure 25). Le jeu C présentait l'architecture et le fonctionnement du système global (le tout).

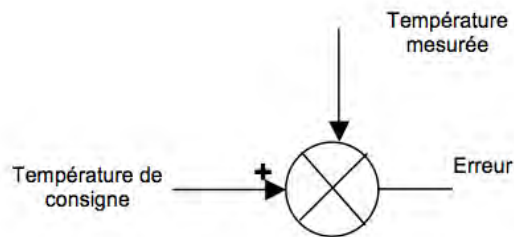


Figure 24 : Système de régulation thermique : un exemple d'élément

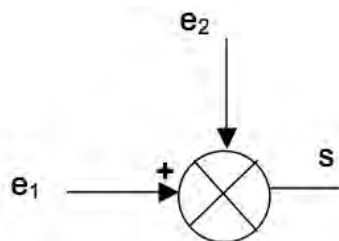


Figure 25 : Système de régulation thermique : un exemple d'élément

Chaque planche était construite autour d'une représentation graphique et d'un texte pour expliquer les définitions.

Le temps d'étude était laissé libre et la programmation de la navigation n'autorisait pas de retour en arrière. Les participants étaient répartis dans trois groupes de façon aléatoire :

- Groupe 1 : « éléments partiellement isolés avant système global » (jeu A puis jeu C) ;
- Groupe 2 : « système global avant éléments partiellement isolés » (jeu C puis jeu A) ;
- Groupe 3 : « éléments totalement isolés avant système global » (jeu B puis jeu C).

3-3 Procédure expérimentale

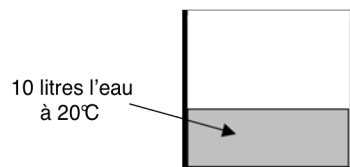
Après avoir répondu au pré-test une semaine auparavant, les étudiants ont été répartis, de façon aléatoire, dans trois les groupes expérimentaux. Les ordinateurs étaient configurés pour une ou l'autre des trois versions. En entrant dans la salle, les élèves tiraient au sort un numéro de poste et s'y rendaient, s'y installaient et attendaient la consigne avant de se lancer dans l'étude qui leur était proposée.

3-3-1 Pré-test

Un pré-test (voir annexe 2), donné une semaine avant l'apprentissage, a permis d'évaluer les

connaissances préalables des étudiants dans le domaine de la régulation de température. Ce pré-test était composé de cinq questions sur des notions générales de thermodynamique (voir un exemple en figure 26), cinq questions sur les processus de régulation (voir un exemple en figure 27) et de deux questions sur les composants utilisés dans les procédés thermiques industriels (voir un exemple en figure 28). Un point était accordé pour chaque bonne réponse,

Regardez le schéma suivant :



Si on ajoute 10 litres d'eau à 50 °C dans le bac, quelle va être la température des 20 litres d'eau ?

- ☐ °C
- ☐ Je ne sais pas

Figure 26 : exemple de question sur des notions générales de thermodynamique

Une régulation de température dite en « Tout Ou Rien » permet de maintenir une température égale à 0°C ou à 100°C :

- ☐ Vrai
- ☐ Faux
- ☐ Je ne sais pas

Figure 27 : exemple de question sur les processus de régulation

Un thermoplongeur est un composant destiné à :

- ☐ fournir de l'énergie calorifique
- ☐ extraire de l'énergie calorifique
- ☐ mesurer la température d'un milieu
- ☐ Je ne sais pas

Figure 28: Exemple de question sur les composants utilisés dans les procédés thermiques industriels

zéro point pour une réponse erronée ou pas de réponse. Le temps de l'étude était libre.

3-3-2 Phase d'étude

En attendant la consigne, les élèves étaient face à un écran neutre qui leur indiquait qu'ils participaient à une étude de psychologie cognitive. Ils n'avaient pas de quoi écrire ni de quoi calculer. Après avoir reçu la consigne, ils commençaient l'étude du matériel d'apprentissage en silence. A la fin de l'étude, ils restaient devant l'ordinateur en attendant que tous les participants aient fini.

3-3-3 Post-test

Entre la fin de la session d'apprentissage et le début du post- test, une pause d'une durée de 5 minutes puis une suite d'opérations arithmétiques était donnée aux élèves pour s'affranchir de l'effet de récence. Ensuite, les étudiants devaient répondre à un post-test (voir annexe 2) composé de dix questions. Huit questions prise parmi celles du pré-test plus deux questions de transfert (une dans le domaine de la régulation de vitesse et l'autre dans le domaine de la régulation de pression). Le temps de la passation était libre.

3-3-4 Variables indépendantes et dépendantes

Dans cette expérience, nous avons une variable ordre de présentation, notée *OP* indépendante à trois modalités pour l'ordre de présentation des informations :

OP: {éléments partiellement isolés avant système global; système global avant éléments partiellement isolés ; éléments totalement isolés avant système global }

et deux variables dépendantes notées *SCr1* et *SCr2* calculées à partir d'un score relatif obtenu par la relation suivante :

$$SCr1 = \frac{\text{Nombre de bonnes réponses hors transfert}}{\text{Nombre total de questions hors transfert}}$$

et

$$SCr2 = \frac{\text{Nombre de bonnes réponses pour transfert}}{\text{Nombre total de questions pour transfert}}$$

4- Résultats

Les scores relatifs ont été calculés pour le pré-test et pour le post-test, selon la même formule que pour l'expérience précédente (i.e. le nombre de bonnes réponses est divisé par le nombre totale de réponses). Le tableau 3 présente pour chaque groupe expérimental, la moyenne et l'écart type des scores relatifs au pré-test, aux questions du post-test hors questions de transfert et aux questions de transfert.

Le calcul d'ANOVA montre qu'il n'y avait pas de différences significatives entre les trois groupes sur le pré-test ($F(2,61) = 0,38$; $p > 0,6$). Ceci indique que les participants des trois groupes n'étaient en moyenne pas différents sur le plan de leurs connaissances préalables dans le domaine de la régulation de température.

Au niveau du post-test, il y a un effet principal du matériel expérimental sur l'apprentissage $F(2,61) = 3,18$; $p < 0,05$).

	Pré-test	Post-test (hors transfert)	Transfert
Eléments partiellement isolés avant système global (n = 21)	0,45 (0,20)	0,51 (0,20)	0,21 (0,37)
Système global avant éléments partiellement isolés (n =21)	0,42 (0,20)	0,57 (0,22)	0,17 (0,37)
Eléments totalement isolés avant système global (n = 21)	0,39 (0,25)	0,67 (0,18)	0,64 (0,42)

Tableau 3 : Taux moyen de bonnes réponses (écart type) pour l'expérience 2.

Le test post-hoc de Tukey montre qu'il y a une différence entre la condition « éléments totalement isolés avant système global » et « éléments partiellement isolés avant système global » mais pas de différence entre la condition « système global avant éléments partiellement isolés » et les deux autres conditions ($p > 0,1$ dans les deux cas).

Il y a un effet principal du matériel sur les questions de transfert ($F(2,61) = 9,60$; $p < 0,01$). Le test post-hoc de Tukey montre une différence entre la condition « éléments isolés avant système global » et les deux autres conditions ($p < 0,01$ dans les deux cas) mais pas de

différence entre ces deux autres conditions ($p > 0,1$). Comme au niveau du pré-test les écarts types étaient importants, il est possible de faire l'hypothèse que les différences non significatives observées au pré-test étaient liées à la taille de la variance plutôt qu'à la faible différence de taux moyens entre les trois groupes. Nous avons effectué une analyse de covariance, en utilisant les pré-tests comme covariables. Cette analyse confirme un effet sur les post-tests ($F(2,61) = 4,80$; $p < 0,05$) et sur le transfert ($F(2,61) = 10,21$; $p < 0,01$).

Deux groupes ont bénéficié d'un apprentissage entre le pré-test et le post-test. La différence entre le pré-test et le post-test est significative pour le groupe « éléments partiellement isolés avant système global » ($t(20) = -3,46$; $p < 0,01$) et pour le groupe « système global avant éléments partiellement isolés » ($t(20) = -8,10$; $p < 0,001$). Il n'y a pas de gain d'apprentissage pour la condition « éléments partiellement isolés avant système global » ($t(20) = -1,37$; $p < 0,1$).

5- Discussion

Il semble, qu'avec ce matériel expérimental, l'isolement des éléments a un effet important sur l'apprentissage et que l'ordre de présentation n'a pas d'importance. Nous vérifions, en accord avec la théorie de la charge cognitive, que la présentation des éléments en isolation totale avant la présentation du système global donne un apprentissage significatif mais nous remarquons aussi qu'un apprentissage significatif existe si nous commençons par la présentation du système global puis les éléments en isolation partielle dans la deuxième phase de l'étude. Ces résultats appellent deux remarques importantes :

- 1- Comme pour l'expérience 1, malgré la complexité plus importante du matériel, la présentation du tout avant les parties donne des performances d'apprentissage significatives ce qui ne va pas dans le sens de la théorie de la charge cognitive ;
- 2- Selon le sens de présentation, le degré d'isolement des éléments semble avoir une importance.

Cette expérience était réalisée pour tester l'effet du degré d'isolement des éléments dans un scénario d'apprentissage allant des parties vers le tout, cette expérience n'a donc pas testé la condition « système global avant éléments totalement isolés ». Conformément à notre programme de travail, nous avons alors souhaité mener deux expérimentations complémentaires fondées sur un matériel à apprendre très complexe pour continuer à tester l'effet du degré d'isolement des éléments (expérimentation 3). Les deux effets (ordre de présentation et degré d'isolement) seront traités dans une quatrième expérience.

Chapitre 7

Expérimentation 3. Apprentissage en deux étapes : Effet du degré d'isolement dans un environnement très complexe⁴

1- Objectifs et hypothèses

L'objectif de cette étude était de comparer, toujours dans un séquençement en deux étapes et avec un sens de présentation allant des parties vers le tout, deux degrés d'isolement des éléments (isolement total et isolement partiel) avec une présentation directe du tout. Cette étude avait pour objectif de tester si l'effet de l'isolement des éléments en interaction pouvait être considéré comme un effet général de simplification du matériel ou s'il était plus étroitement lié à l'isolement des éléments. Pour réaliser cette étude, nous avons conçu un matériel à apprendre très complexe mobilisant de très nombreux éléments, de très nombreuses interactions de natures très différentes répartis sur un grand nombre de planches.

Conformément à la théorie de la charge cognitive, et avec ce matériel très complexe, nous émettons l'hypothèse que la présentation des éléments en isolement total avant la présentation du tout donnera de meilleurs performances d'apprentissage.

2- Contexte technique et scientifique du support

Le contexte technique et scientifique du support de cette expérience est la réduction des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) par une optimisation de la consommation de carburant des groupes motopropulseurs installés dans les voitures automobiles. La solution étudiée avec le matériel expérimental concerne les aspects fonctionnels, structurels et comportementaux d'une motorisation hybride thermique-électrique, c'est-à-dire l'association d'un moteur thermique et d'une machine électrique (voir figure 29). Chaque moteur thermique

⁴ Bellec, D., Tricot, A., & Ayres, P. (2012). A comparison of different levels of interactions when using the isolated-elements strategy. *EARLI SIG2 meeting*, Grenoble, August 29-31.

est caractérisé par un ensemble de courbes dites d'iso-consommation qui permettent de repérer la zone où le point de fonctionnement est optimal c'est-à-dire où sa consommation de carburant en g/KWh est la plus favorable. A ce point de fonctionnement, le moteur thermique travaille à son meilleur rendement et les émissions de CO_2 sont alors réduites à leur minimum.

L'hybridation permet de faire fonctionner le moteur thermique soit à son point de fonctionnement le plus favorable, soit de l'arrêter (il n'émet alors plus de CO_2). Dans les phases où le moteur thermique est arrêté, c'est la machine électrique qui prend le relais, alimentée par les batteries électriques. De plus, pour augmenter la durée des phases où le moteur thermique est à l'arrêt, la réversibilité de la machine électrique permet lors des décélérations, du freinage ou en descente dans des forts dénivelés de récupérer de l'énergie mécanique et de la transformer en énergie électrique stockable dans des batteries.

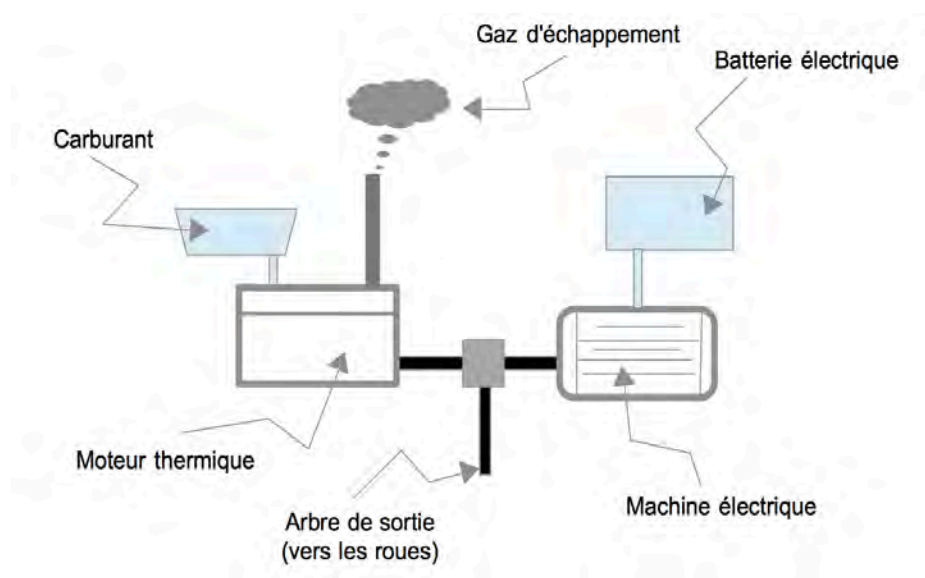


Figure 29 : Architecture d'un groupe motopropulseur hybride thermique-

La problématique générale de ce type d'application est d'implémenter une stratégie de commande qui, tout en optimisant les émissions de CO_2 , permet d'assurer un fonctionnement confortable et en sécurité de la voiture dans toutes les configurations possibles (freinage, accélération, allure de croisière, ...).

3- Méthode

3-1 Participants

46 lycéens de première Sciences et Technologies Industrielles d'un lycée d'Enseignement Général et Technologique de Poitiers (France) ont participé à cette expérience (âge moyen :

17, 3 ans). Les élèves ont participé volontairement à l'expérience. Ils n'avaient reçu aucune formation au préalable dans le domaine de la motorisation thermique ni dans les stratégies d'hybridation des groupes motopropulseurs. Les étudiants étaient informés que les résultats de cette expérimentation étaient confidentiels et n'avaient donc aucune conséquence sur leur moyenne scolaire.

3-2 Matériel d'apprentissage

Le matériel d'apprentissage était composé de trois versions d'un cours sur la réduction des émissions de CO₂ dans les transports automobiles à l'aide de la motorisation hybride. Chaque diapositive était composée d'un texte et d'une représentation graphique.

Une version A proposait un séquençement de l'apprentissage allant du simple vers le complexe avec dans un premier temps un jeu de neuf diapositives qui présentait des éléments totalement isolés puis un jeu de douze diapositives incluant l'ensemble des informations à apprendre avec une approche fonctionnelle, structurelle, et comportementale et avec tous les éléments en interaction.

Une version B proposait aussi un séquençement du simple vers le complexe mais avec un jeu de neuf diapositives qui présentait cette fois les éléments partiellement isolés puis un jeu de douze diapositives incluant l'ensemble des informations à apprendre avec une approche fonctionnelle, structurelle, et comportementale et avec tous les éléments en interaction (le même que celui présenté dans la version A).

Une version C présentait deux fois le jeu de douze diapositives incluant l'ensemble des informations à apprendre avec une approche fonctionnelle, structurelle, et comportementale et avec tous les éléments en interaction. Cette dernière version dite « contrôle » était intégrée au matériel d'apprentissage pour qu'un groupe de sujet bénéficie de deux jeux de diapositives à étudier (comme les deux autres groupes).

Les diapositives qui présentaient les éléments étaient les suivantes (quelques unes sont présentées dans l'annexe 3) :

- page 1 : Forces en présence lors du déplacement d'un véhicule ;
- page 2 : Puissance d'un moteur ;
- page 3 : Couple moteur ;
- page 4 : Energie ;

- page 5 : Courbe d'iso-consommation et rendement des moteurs thermiques ;
- page 6 : Réversibilité d'une machine électrique ;
- page 7 : Energie cinétique ;
- page 8 : Batteries électriques ;
- page 9 : Pouvoir énergétique de l'essence et émissions de CO₂.

Les diapositives qui présentaient le tout avec tous les éléments en interaction étaient les suivantes :

pour les aspects fonctionnels,

- page 1 : Contexte général de la réduction des émissions de CO₂ ;
- page 2 : Intérêts de la voiture hybride ;
- page 3 : Assistance électrique en traction.

Pour les aspects structurels,

- page 4 : Organisation générale d'une motorisation hybride ;
- page 5 : Régime de fonctionnement à vitesse intermédiaire ;
- page 6 : Récupération d'énergie au freinage.

Et, pour les aspects comportementaux,

- page 7 : Hypothèses de calculs ;
- pages 8, 9 et 10 : Calcul du gain d'émissions de CO₂ à vitesse intermédiaire ;
- pages 11 et 12 : Calcul de récupération d'énergie au freinage.

Pour chaque version, il n'était pas possible de passer de la partie présentant les éléments à la partie présentant le tout. Par ailleurs, il était possible de naviguer à l'intérieur de chaque partie.

Le niveau de complexité du tout était considéré comme très important car il impliquait l'étude de tous les éléments pour élaborer les connaissances nécessaires à la compréhension des aspects fonctionnels, structurels et comportementaux de l'intégration de la motorisation

hybride dans les véhicules automobiles. Pour répondre aux questions posées au post-test et relatives à la compréhension, il fallait manipuler trois niveaux d'informations contextuelles :

Sur l'aspect énergétique :

- réservoir contenant de l'essence ou pas ;
- batteries électriques chargées ou pas.

Sur les conditions d'utilisation :

- démarrage ;
- freinage non urgent ;
- fortes accélérations ;
- vitesse intermédiaire.

Sur les variables

- effort ;
- puissance ;
- énergie cinétique ;
- émission de CO₂ ;
- transformation d'énergie mécanique – électrique ;
- stockage d'énergie.

3-3 Procédure expérimentale

Après avoir répondu à un pré-test une semaine auparavant, les élèves ont été répartis, de façon aléatoire, dans les trois groupes expérimentaux. Les ordinateurs étaient configurés pour une ou l'autre des trois versions. En entrant dans la salle, les élèves tiraient au sort un numéro de poste et s'y rendaient, s'y installaient et attendaient la consigne avant de se lancer dans l'étude qui leur était proposée. A la fin de la première partie de l'étude, ils devaient répondre à l'échelle auto rapportée de mesure d'effort mental. A la fin de l'étude, ils devaient encore répondre à l'échelle de mesure de l'effort mental puis à un post-test.

3-3-1 Pré-test

Un pré-test (voir annexe 3), donné une semaine avant la session d'apprentissage, a permis d'évaluer les connaissances préalables des étudiants dans le domaine de la motorisation hybride. Ce pré-test était composé de vingt neuf questions : vingt questions de rappel dont les

réponses sont explicitement dans le matériel à étudier (voir un exemple en figure 30) et 9 questions de compréhension qui mobilisaient les connaissances apprises par les participants pour les réinvestir dans la résolution d'un problème issu dans le contexte de la motorisation hybride appliquées au transport automobile (voir un exemple en figure 31).

G3- 1 litre d'essence brûlé rejette :

- ☐ 2,28 Kg de CO₂
- ☐ 228 g de CO₂
- ☐ Je ne sais pas

Figure 30 : Exemple de question de rappel pour l'expérience 3

D4- Les batteries sont chargées et le réservoir d'essence est vide. Indiquez le sens de transfert de l'énergie quand la voiture commence à rouler.

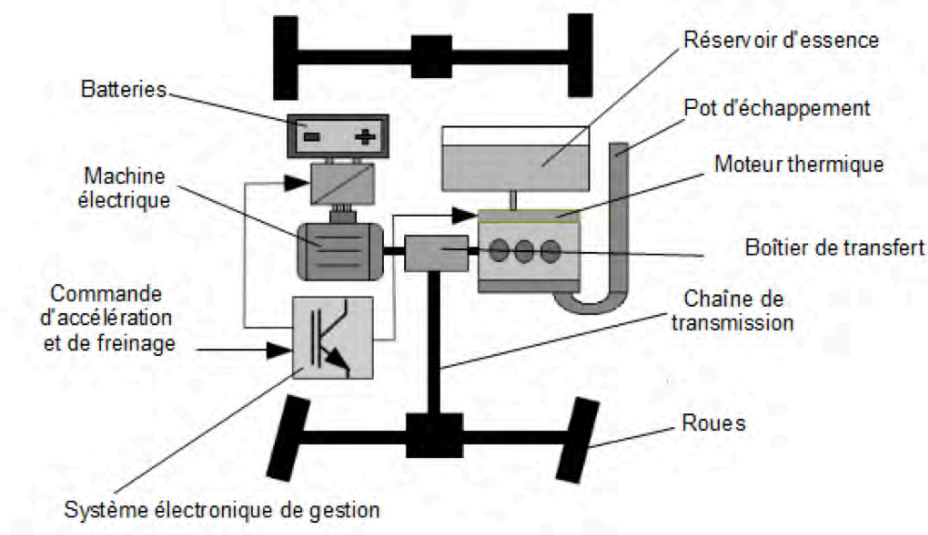


Figure 31: Exemple de question de compréhension pour l'expérience 3

3-3-2 Phase d'étude

En attendant la consigne, les élèves étaient face à un écran qui leur indiquait qu'ils participaient à une étude de psychologie cognitive. Ils n'avaient pas de quoi écrire ni de quoi calculer. Après avoir reçu la consigne, ils commençaient l'étude du matériel d'apprentissage dans le silence. Ils étaient informés que l'étude se déroulait en deux parties et qu'à la fin de chaque partie (indiquée par le logiciel), ils devaient lever le doigt pour appeler l'expérimentateur. Celui-ci leur remettait un document à remplir composé d'une échelle de Lickert en neuf points pour rendre compte de l'effort mental consenti dans la partie de l'étude qu'ils venaient de traiter puis ils restaient devant l'ordinateur en attendant que tous les participants aient fini.

3-3-3 Post-test

Entre la fin de la session d'apprentissage et le début du post-test, une pause d'une durée de 5 minutes puis une suite d'opérations arithmétiques était donnée aux élèves pour s'affranchir de l'effet de récence. Ensuite, les étudiants devaient répondre à un post-test (voir annexe 3) comportant les mêmes questions qu'au pré-test. Un point était accordé pour chaque bonne réponse, zéro point pour une réponse erronée ou pas de réponse. Le temps de l'étude était libre.

3-3-4 Variables indépendantes et dépendantes

Dans cette expérience, nous avons une variable ordre de présentation, notée *OP* indépendante à trois modalités pour l'ordre de présentation des informations :

OP: {éléments partiellement isolés avant système global; système global avant éléments partiellement isolés ; éléments totalement isolés avant système global}

et deux variables dépendantes notées *SC1*, *SC2* obtenues par la relation suivante :

SC1 = *Nombre de bonnes réponses aux questions de rappel*

SC2 = *Nombre de bonnes réponses aux questions de compréhension*

4- Résultats

Le tableau 4 présente, pour chaque groupe expérimental, la moyenne et l'écart type des scores relatifs au pré-test puis au post test pour les questions de compréhension (il y en avait 9 au total).

	Pré-test	Post-test
Parties vers Tout avec éléments totalement isolés (n = 14)	3,1 (1,81)	3,3 (2,25)
Parties vers Tout avec Eléments partiellement isolés (n = 16)	2 (2,5)	3,7 (1,82)
Tout présenté deux fois (n = 16)	1,9 (2,01)	4,1 (2,24)

Tableau 4 : Nombre moyen de bonnes réponses (écart type) pour l'expérience 3.

Le tableau 5 présente, pour chaque groupe expérimental, la moyenne et l'écart type des évaluations auto-rapportées d'effort mental consenti à la suite de la première étape puis de la deuxième étape de l'étude.

	Etape 1	Etape 2
Parties vers Tout avec éléments totalement isolés (n =14)	4 (1,0)	6,44 (1,5)
Parties vers Tout avec Eléments partiellement isolés (n = 16)	4,5 (1,6)	4,44 (1,8)
Tout présenté deux fois (n = 16)	4,5 (1,2)	4,57 (1,8)

Tableau 5 : Moyennes (écart type) des évaluations auto-rapportées sur l'effort mental consenti par les apprenants durant les étapes 1 et 2

Les scores ont été analysés par une ANOVA en utilisant le gain d'apprentissage pour chaque participant (post-test - pré-test). Il n'y avait pas de différence significative entre les

trois conditions pour les scores de rappel : $F(2,40) = 1,79$, ns.

Pour les questions de compréhension, il y avait une différence significative : $F(2, 40) = 3.49$, $p < .05$. Des tests de Tukey B post hoc ont révélé une différence significative entre la présentation du tout en premier et la présentation des éléments isolés en premier : la présentation du tout était supérieure.

Pour l'effort mental durant la phase 1, il n'y avait pas de différence significative : $F(2,40) = 1,47$, ns. Cependant il y avait une différence significative pour la phase 2 : $F(2, 40) = 5,25$, $p < .01$. Des tests de Tukey B post hoc ont révélé que le groupe qui a commencé par la présentation des éléments sans interactions avait investi un effort mental significativement supérieur aux deux autres groupes.

5- Discussion

De façon inattendue, par rapport à la recherche précédente, isoler totalement les éléments dans la phase initiale de l'apprentissage d'un contenu très complexe n'a pas conduit à de meilleurs résultats. Bien qu'il n'y ait pas de différence sur les questions de rappel entre les trois conditions de présentation, la stratégie d'isolement total donnait de moins bons résultats sur les problèmes de compréhension.

Concernant l'effort mental investi dans la phase 1 de l'étude, il n'y a pas de différences significatives entre les 3 groupes mais, à l'issue de la deuxième phase de l'apprentissage, il apparaît une différence significative entre le groupe qui a commencé avec les éléments en forte isolation et les deux autres groupes : le groupe qui a étudié les éléments fortement isolés en premier a dû fournir un effort mental très important lorsqu'il est passé à l'étude du contenu complexe.

Ces résultats suggèrent que pour comprendre des contenus très complexes, la présentation des éléments avec leurs diverses interactions peut être nécessaire pour apprendre avec succès.

Chapitre 8

Expérimentation 4

Apprentissage en deux étapes :

Effet de l'ordre de présentation et du degré d'isolement dans un environnement très complexe⁵

1- Objectifs et hypothèses

L'objectif de cette étude était de comparer, toujours dans un séquençement en deux étapes, les deux degrés d'isolement des éléments (isolement total et isolement partiel) et l'ordre de présentation (des parties vers le tout et le tout vers les parties). Pour réaliser cette étude, nous avons repris le matériel très complexe utilisé dans l'expérience 3.

Conformément à la théorie de la charge cognitive, et avec ce matériel très complexe, nous émettons l'hypothèse qu'avec un matériel très complexe, l'ordre de présentation des parties vers le tout avec l'isolement total des parties donnera les meilleures performances d'apprentissage.

2- Contexte technique et scientifique

Le contexte technique et scientifique de cette expérience était le même que celui de l'expérience 3.

3- Méthode

3-1 Participants

84 lycéens de première Sciences et Technologies Industrielles d'un Lycée d'Enseignement

⁵ Bellec, D., Tricot, A., & Ayres, P. (2013). A comparison of different design when using the isolated-elements strategy. 6th International Cognitive Load Theory Conference, Toulouse, 26-28 Juin.

Général et Technologique de Poitiers (France) ont participé à cette expérience (âge moyen : 16,9 ans). Les élèves ont participé volontairement à l'expérience. Ils n'avaient reçu aucune formation au préalable dans le domaine de la motorisation thermique ni dans les stratégies d'hybridation des groupes motopropulseurs.

3-2 Matériel d'apprentissage

Le matériel d'apprentissage était composé de cinq versions d'un cours multimédia sur la réduction des émissions de CO₂ dans les transports automobiles à l'aide de la motorisation hybride. Chaque diapositive était composée d'un texte et d'une représentation graphique. Ce matériel reprenait les 3 versions A, B, et C de l'expérience n° 3 auxquelles s'ajoutaient deux versions D et E qui proposaient un séquençement de l'apprentissage allant du tout vers les parties. La version D présentait, dans un premier temps, le jeu de 12 diapositives avec tous les éléments en interaction puis un jeu de neuf diapositives avec les éléments totalement isolés. La version E présentait le jeu de neuf diapositives avec les éléments partiellement isolés avant de présenter le jeu de 12 diapositives avec tous les éléments en interaction.

3-3 Procédure expérimentale

Après avoir répondu à un pré-test une semaine auparavant, les élèves ont été répartis, de façon aléatoire, dans les cinq groupes expérimentaux. Les ordinateurs étaient configurés pour une ou l'autre des cinq versions. En entrant dans la salle, les élèves tiraient au sort un numéro de poste et s'y rendaient, s'y installaient et attendaient la consigne avant de se lancer dans l'étude qui leur était proposée. A la fin de la première partie de l'étude, ils devaient répondre à l'échelle auto rapportée de mesure d'effort mental. A la fin de l'étude, ils devaient de nouveau répondre à l'échelle de mesure de l'effort mental puis à un post-test.

3-3-1 Pré-test

Un pré-test donné une semaine avant la session d'apprentissage, a permis d'évaluer les connaissances préalables des élèves dans le domaine de la motorisation hybride. Ce pré-test était composé de 37 questions (présentées en annexe 4) :

- 18 questions de connaissance des éléments ;
- 19 questions de compréhension qui mobilisaient les connaissances pour résoudre un problème issu dans le contexte de la motorisation hybride appliqué au transport automobile.

3-3-2 Phase d'étude

En attendant la consigne, les élèves étaient face à un écran qui leur indiquait qu'ils participaient à une étude de psychologie cognitive. Ils n'avaient pas de quoi écrire ni de quoi calculer. Après avoir reçu la consigne, ils commençaient l'étude du matériel d'apprentissage dans le silence. Ils étaient informés que l'étude se déroulait en deux parties et qu'à la fin de chaque partie (indiquée par le logiciel), ils devaient lever le doigt pour appeler l'expérimentateur. Celui-ci leur remettait un document à remplir composé d'une échelle de Likert en neuf points pour rendre compte de l'effort mental consenti dans la partie l'étude qu'ils venaient de traiter puis ils restaient devant l'ordinateur en attendant que tous les participants aient fini.

3-3-3 Post-test

Entre la fin de la session d'apprentissage et le début du post-test, une pause d'une durée de 5 minutes puis une suite d'opérations arithmétiques était donnée aux élèves pour s'affranchir de l'effet de récence. Ensuite, ils devaient répondre à un post-test (voir annexe 4) comportant les mêmes questions qu'au pré-test plus 5 questions de transfert sur l'hybridation pour réduire les émissions de CO₂ vers des applications thermiques, d'éclairage et pneumatiques. Un point était accordé pour chaque bonne réponse, zéro point pour une réponse erronée ou pas de réponse. Le temps de l'étude était libre.

A l'issue de chaque partie de l'étude, chaque participant répondait à une échelle auto-rapportée d'effort mental (Van Merriënboer & Pass, 1998).

3-3-4 Variables indépendantes et dépendantes

Dans cette expérience, nous avons une variable ordre de présentation, notée *OP* indépendante à cinq modalités pour l'ordre de présentation des informations :

OP: {éléments partiellement isolés avant système global; système global avant éléments partiellement isolés ; éléments totalement isolés avant système global ; système global avant éléments totalement isolés ; système global présenté deux fois}

et trois variables dépendantes notées *SCr1*, *SCr2* et *SCr3* calculées à partir des relations suivantes :

$$SCr1 = \frac{\text{Nombre de bonnes réponses aux questions de connaissances}}{\text{Nombre total de questions de rappel}}$$

$$SCr2 = \frac{\text{Nombre de bonnes réponses aux questions de compréhension}}{\text{Nombre total de questions de compréhension}}$$

$$SCr3 = \frac{\text{Nombre de bonnes réponses aux questions de transfert}}{\text{Nombre total de questions de transfert}}$$

4- Résultats

Le calcul d'ANOVA montre qu'il n'y avait pas de différences significatives entre les 5 groupes sur les pré-tests aux questions de connaissances ($F(4,79) = 0,261$; $p > .9$) et sur les pré-test aux questions de compréhension ($F(4,79) = 1,43$; $p > .2$). Ceci indique que les participants des cinq groupes n'étaient en moyenne pas différents sur le plan de leurs connaissances préalables dans le domaine de la motorisation hybride.

Pour les questions de connaissances :

Les résultats sont donnés dans le tableau 6. Au niveau du post-test, il y a un effet principal du matériel expérimental sur l'apprentissage ($t(83) = -4,002$; $p < .05$) mais nous n'observons pas de différences significatives entre les différentes conditions ($F(4,79) = 0,989$, $p > .48$). Ceci nous montre que les participants ont bénéficié d'un apprentissage mais qu'aucune des conditions expérimentales n'a été meilleure qu'une autre. Des tests de Tukey post hoc n'ont pas montré de résultats significatifs.

	Prétest	Post test
Parties vers Tout avec éléments totalement isolés (n = 18)	0,57 (0,14)	0,66 (0,16)
Parties vers Tout avec éléments partiellement isolés (n = 15)	0,57 (0,14)	0,62 (0,12)
Tout présenté deux fois (n = 18)	0,54 (0,11)	0,58 (0,14)
Tout vers Parties avec éléments totalement isolés (n = 17)	0,56 (0,11)	0,56 (0,16)
Tout vers Parties avec éléments partiellement isolés (n = 16)	0,59 (0,14)	0,59 (0,16)

Tableau 6: Moyennes et écarts types pour les questions de connaissances dans l'expérience 4

Pour les questions de compréhension

Le tableau 7 présente, pour chaque groupe expérimental, la moyenne et l'écart type des scores relatifs aux questions de compréhension posées au prétest et au post test (il y en avait 19 au total).

	Prétest	Post test
Parties vers Tout avec éléments totalement isolés (n = 18)	0,43 (0,1)	0,41 (0,02)
Parties vers Tout avec éléments partiellement isolés (n = 15)	0,47 (0,16)	0,46 (0,01)
Tout présenté deux fois (n = 18)	0,38 (0,10)	0,58 (0,15)
Tout vers Parties avec éléments totalement isolés (n = 17)	0,39 (0,13)	0,56 (0,04)
Tout vers Parties avec éléments partiellement isolés (n = 16)	0,41 (0,11)	0,56 (0,18)

Tableau 7: Moyennes et écarts types pour les questions de compréhension dans l'expérience 4

Au niveau du post-test, il y a un effet principal du matériel expérimental sur l'apprentissage ($t(83) = -5,12$; $p < .05$). Des tests de Tukey post hoc ont montré une différence significative entre la condition « système global avant éléments partiellement isolés » et la condition « éléments partiellement isolés avant système global ». La condition « système global avant éléments partiellement isolés » est la plus favorable.

Pour les questions de transfert

Le tableau 8 présente pour chaque groupe expérimental, la moyenne et l'écart type des scores relatifs aux questions de transfert posées au post test (il y en avait 5 au total).

Le calcul d'ANOVA montre qu'il y avait des différences significatives entre les 5 groupes au niveau des questions de transfert ($F(4,79) = 3,72$; $p < .05$). Des tests de Tuckey post hoc ont montré une différence significative entre la condition « système global avant éléments partiellement isolés » et la condition « système global avant éléments totalement

isolés », la condition « système global avant éléments totalement isolés » étant plus favorable. Nous observons aussi une différence significative entre la condition « éléments partiellement isolés avant système global » et la condition « système global avant éléments partiellement isolés », la condition « éléments partiellement isolés avant système global » étant la plus favorable.

	Transfert
Parties vers Tout avec éléments totalement isolés (n = 18)	0,44 (0,2)
Parties vers Tout avec éléments partiellement isolés (n = 15)	0,57 (0,19)
Tout présenté deux fois (n = 18)	0,48 (0,21)
Tout vers Parties avec éléments totalement isolés (n = 17)	0,6 (0,24)
Tout vers Parties avec éléments partiellement isolés (n = 16)	0,31 (0,19)

Tableau 8: Moyennes et écarts types pour les questions de transfert dans l'expérience 4

Pour l'effort mental consenti

Pour l'effort mental durant la phase 1, il y avait une différence significative entre les groupes : $F(4,79) = 5,50$, $p < .05$. Des tests de Tuckey post hoc ont révélé que les 3 groupes qui ont commencé par la présentation du tout ont fourni un effort significativement plus important que les 2 autres groupes. Pour l'effort mental durant la phase 2, il y avait aussi une différence significative entre les groupes. Des tests de Tuckey post hoc ont révélé que les groupes « Parties vers Tout avec éléments totalement isolés » et « Tout vers Parties avec éléments totalement isolés » étaient significativement différents. Le groupe « Tout vers Parties avec éléments totalement isolés » a fourni un effort plus important.

5- Discussion

Pour les questions de compréhension, la présentation du tout dans la première étape puis les éléments partiellement isolés dans la deuxième étape se distingue des autres conditions

d'apprentissage par le fait que les participants ont mieux répondu aux questions. Ce résultat n'est pas en accord avec la théorie de la charge cognitive qui prédit une meilleure performance lorsque l'ordre de présentation va des parties vers le tout avec les parties totalement isolées. Nous observons par ailleurs que l'effort mental consenti durant la première étape est plus important lorsque les apprenants sont directement confrontés au tout. Nous pouvons émettre l'hypothèse que la présentation du tout dans la première étape du scénario d'apprentissage impose un traitement plus en profondeur, bon prédicteur d'une élaboration des connaissances nécessaires à la compréhension d'un ensemble très complexe.

Pour les questions de transfert, nous avons les meilleures performances lorsque dans la première étape, nous présentons des interactions soit en présentant le tout dans la première étape puis les parties sans les interactions dans la deuxième étape, soit en présentant les parties partiellement isolées dans la première étape puis le tout dans la deuxième étape. Ces résultats ne sont pas en accord avec la théorie de la charge cognitive mais restent cohérents avec l'idée que pour élaborer des connaissances mobilisables dans la résolution de problèmes, il est nécessaire de traiter le matériel d'apprentissage en profondeur.

Ces résultats nous suggèrent que pour apprendre, il est nécessaire d'introduire une difficulté dans la première étape de l'apprentissage en présentant de nombreux éléments en interaction (le tout) ou bien des parties avec leurs interactions (éléments partiellement isolés) quitte à surcharger temporairement la mémoire de travail. Ce sont des stratégies qui permettent d'engager les apprenants dans le processus d'apprentissage par l'intérêt, la découverte de la nouveauté, l'enjeu. La deuxième étape doit être adaptée pour permettre les traitements nécessaires à l'élaboration des connaissances sans surcharge de la mémoire de travail.

Synthèse de la contribution empirique

Avec ces quatre études, nous avons manipulé le niveau de complexité du matériel à apprendre ainsi le degré d'isolement des éléments en interaction dans des scénarios d'apprentissage en deux étapes.

Avec la première étude, d'un caractère exploratoire, nous avons commencé par un matériel simple (peu d'éléments, interactions simples et peu nombreuses) et nous n'avons pas trouvé d'effet de l'ordre de présentation.

Avec la deuxième expérience, nous avons augmenté la complexité du support d'apprentissage et nous avons obtenu un faible gain d'apprentissage (un petit gain mais une différence significative entre le pré-test et le post-test). L'ordre de présentation ne semble pas jouer de rôle dans ces deux premières expériences. Par ailleurs, nous observons dans cette deuxième expérience qu'un séquençement des parties vers le tout avec une présentation des éléments isolés en premier se distingue nettement par la supériorité des performances obtenues pour les questions de compréhension et pour les questions de transfert. Cette deuxième expérience montre que dès que des interactions sont en présence entre les éléments d'un tout, la question de la manière de procéder à l'isolement des éléments se pose et qu'avec un matériel d'une complexité moyenne, nous n'observons pas d'effet de l'ordre de présentation.

A la suite de ces deux premières expériences, nous n'avons pas pu constater l'effet de l'ordre de présentation évoqué par la théorie de la charge cognitive mais nous avons observé dans la deuxième expérience que l'isolation des éléments avait un effet sur les performances d'apprentissage. Pour les études suivantes, nous avons souhaité expérimenter ces deux effets avec un matériel beaucoup plus complexe et nous avons procédé en deux étapes : une expérience 3 pour tester l'effet de l'isolement des éléments dans une présentation des parties vers le tout puis une expérience 4 pour tester s'il existe un effet de l'ordre de présentation mais aussi une interaction entre le degré d'isolement des éléments et l'ordre de présentation. Nous avons alors construit un matériel basé sur un système technique beaucoup plus complexe mettant en œuvre simultanément de nombreuses variables, de nombreux composants en interactions ainsi que de nombreuses configurations de fonctionnement.

L'expérience 3 nous a permis de continuer à tester l'effet de l'isolement dans une stratégie de présentation allant des parties vers le tout en augmentant la complexité du matériel. Nous avons obtenu de meilleures performances en compréhension avec un isolement partiel des éléments et nous avons observé une forte différence au niveau de l'effort mental ressenti entre la première et la deuxième phase de l'apprentissage lorsque les éléments sont présentés en isolation totale. Nous pouvons suggérer que pour du matériel très complexe, la présentation des éléments en isolation totale impose, au passage à la deuxième étape, un effort mental très important au moment du traitement du tout, la présentation des éléments en isolation partielle peut être alors vue comme une stratégie facilitant le traitement de la complexité.

La quatrième expérience a permis de comparer les conditions « éléments isolés avant le système global » et « système global présenté deux fois », mais aussi avec premièrement une présentation où le système global est présenté avant les éléments isolés comme Mayer, Mautone et Prothero (2002) dans leur troisième expérience, et deuxièmement une présentation où les éléments sont présentés de façon modérément isolée avant et après le système global. Nous avons obtenu un effet d'interaction pour les questions de transfert. Dans le sens de présentation des parties vers le tout, la présentation des éléments en interaction donne de meilleurs résultats alors que pour une présentation du tout vers les parties, c'est la présentation des éléments en isolation totale qui donne de meilleurs résultats. Nous pouvons suggérer que pour du matériel très complexe il est nécessaire de présenter dans une première étape d'apprentissage une partie ou toute la complexité.

En conclusion, nous constatons, à l'issue de ces quatre expériences, qu'un séquençement des parties vers le tout n'est pas toujours pertinent comme la théorie de la charge cognitive le prévoit et que le degré d'isolement des parties extraites du tout a une influence sur les performances d'apprentissage. Dans ces expériences, nous avons manipulé le niveau de complexité du matériel à apprendre. Pour du matériel allant d'une faible complexité à une complexité moyenne, il n'y a pas d'effet du sens de présentation « parties vers tout » ou « tout vers parties ». Pour du matériel très complexe, nous constatons un effet de l'ordre de présentation mais en interaction avec le degré d'isolement des éléments.

Ces résultats, relatifs à un petit nombre d'expériences et qui demanderaient à être confirmés par d'autres expérimentations, sont donc intéressants pour la conception de séquences pédagogiques ayant pour support des systèmes complexes. Notre difficulté s'est surtout concentrée sur l'évaluation de la complexité des supports au moment de la conception

des activités d'apprentissage : nous évaluons assez facilement (mais de façon subjective) ce qui est très complexe, mais moins bien ce qui l'est moyennement et encore moins ce qui ne l'est pas. Une mesure objective de la complexité serait donc à envisager pour mieux contrôler les effets testés.

Partie III

Conclusion générale

Apprendre des connaissances permet une adaptation des individus aux sollicitations de la vie courante dans les domaines personnels et professionnels. Pour apprendre des connaissances qui ne relèvent pas de l'adaptation à l'environnement proche et immédiat, il est nécessaire de faire appel à des situations d'enseignement conçues par d'autres humains et, à l'école, ce sont généralement des enseignants. Dans ces situations artificielles, l'apprentissage nécessite de la part des élèves, du temps, des efforts, et de la motivation.

Parmi ses missions, l'enseignant est un ingénieur pédagogique qui doit concevoir de façon rationnelle des situations d'apprentissage pour que les élèves apprennent des connaissances qui sont dictées par les programmes et les référentiels, eux mêmes imposés par les institutions scolaires. L'exercice du métier d'enseignant est, d'une part fondé sur une très bonne connaissance de sa discipline, de sa didactique mais en plus sur de vraies compétences professionnelles et une solide formation dans les sciences de l'éducation et les sciences cognitives.

La démarche de conception d'environnements d'apprentissage fait appel à des choix parmi des théories pédagogiques (béhaviorisme, constructivisme, socio-constructivisme), parmi des méthodes pédagogiques (méthodes inductives, déductives) mais aussi à des principes d'ergonomie cognitive qui permettent d'optimiser le traitement des informations mises à disposition des élèves au moment même de l'apprentissage. Ces choix ont des impacts dans des temporalités différentes, les principes d'ergonomie ont des conséquences dans la gestion en temps réel des informations par les apprenants. Dans la mesure où le système cognitif est très limité dans ses possibilités de traitement du fait des caractéristiques de la mémoire de travail, il est nécessaire de présenter aux apprenants des environnements d'information adaptés.

La théorie de la charge cognitive présente des résultats empiriques permettant de prescrire des solutions pour faire baisser la charge cognitive et faciliter l'apprentissage. Cette théorie, fondée sur les caractéristiques de l'architecture du système cognitif humain identifie trois types de charge cognitive : la charge cognitive intrinsèque liée à la difficulté de ce qui doit être appris, la charge cognitive extrinsèque liée à la présentation des informations et la charge cognitive pertinente nécessaire au traitement des informations pour construire les connaissances. Ces trois charges sont cumulatives et peuvent conduire à un dépassement des capacités de la mémoire de travail et entraver les apprentissages.

La complexité d'un matériel d'apprentissage ne peut pas toujours être réduite, elle est dépendante du nombre d'information et des interactions à traiter simultanément pour construire des schémas. Une des solutions proposée par les auteurs de la théorie de la charge cognitive, l'effet des éléments interactifs présentés isolément (*the isolated iinteracting elements effect*), est de réduire temporairement la difficulté de traitement en proposant un scénario en deux étapes avec premièrement une présentation des éléments de la complexité (les parties) et deuxièmement le matériel complexe (le tout). Cette proposition pose la question de la manière de procéder à l'isolement des éléments (un isolement partiel ou un isolement total) et pose la question de l'ordre de présentation car la complexité est une réalité de la vie personnelle et professionnelle des apprenants. A ce titre, son traitement pourrait être facilité par leurs connaissances préalables sur le monde présentes en mémoire à long terme.

Nous avons manipulé, au cours de quatre expériences le niveau de complexité du matériel à apprendre et le degré d'isolement des parties vis à vis du tout. Pour du matériel que nous avons évalué de peu complexe à moyennement complexe, nous ne trouvons pas d'effet de l'ordre de présentation sur les performances d'apprentissage, seul le degré d'isolement semble avoir un impact. Pour du matériel que nous avons jugé très complexe, nous obtenons un effet d'interaction : l'apprentissage est meilleur si nous présentons en premier le tout et dans la deuxième étape les parties en totale isolation ; si nous présentons d'abord les parties puis le tout ensuite, l'apprentissage est plus performant si les parties sont partiellement isolées.

Nous avons observé, à partir de nos quatre expériences, que lorsque la complexité n'est pas élevée, la théorie de la charge cognitive permet d'expliquer en partie les résultats obtenus (sur l'effet d'isolement mais pas sur l'ordre de présentation) mais que pour du matériel d'apprentissage d'une grande complexité, cette théorie trouve ses limites car dans un scénario en deux étapes, il semble opportun de présenter de la complexité (soit des parties partiellement isolées, soit le tout) dans la première étape.

Pour tenter d'expliquer ces résultats qui ne vont pas dans le sens de la théorie de la charge cognitive, nous émettons deux hypothèses. Une première liée à la dimension d'engagement des apprenants qui, face à des parties totalement isolées de leur contexte qui manquent donc de sens, n'offrent pas un enjeu d'apprentissage important. Les théories des « *desirable difficulties* » et de l'engagement semblent apporter un éclairage intéressant sur ce point puisqu'elle défendent l'idée qu'un apprenant qui est confronté à des difficultés s'engage plus dans la situation d'apprentissage et donc traite plus en profondeur le matériel. Une

deuxième hypothèse, en relation avec la dimension capacitaire limitée de la mémoire de travail : le coût cognitif du traitement des très nombreuses interactions présentes dans le tout n'est pas résolu par une approche en deux étapes qui commence par des éléments totalement isolés de la complexité. Un prétraitement des interactions est nécessaire pour faciliter l'apprentissage.

Les résultats des travaux empiriques présentés dans cette thèse demanderaient à être confirmés par de nombreuses autres expériences. D'un point de vue méthodologique et pour apporter de la rationalité dans la conception de matériels d'apprentissage pour de futurs travaux, nous pensons qu'il serait utile d'avoir une échelle de mesure de la complexité. Dans ces expériences, nous avons évalué la complexité mais nous ne l'avons pas mesurée.

Finalement, pour apprendre des connaissances secondaires à partir d'un enseignement dans un environnement complexe, l'idée de la simplification temporaire de l'environnement semble être une stratégie intéressante pour améliorer les apprentissages. Cette idée de simplification ne doit cependant pas être considérée comme une simple réduction de la quantité d'informations à traiter mais doit être fondée sur un aménagement de l'environnement qui respecte la caractéristique naturelle des humains à traiter de la complexité (par l'enjeu, la surprise, le défi). La théorie de la charge cognitive propose une simplification de la complexité qui satisfait aux limites de traitement de la mémoire de travail (pas beaucoup d'informations, pas d'interactions) mais ne donne pas suffisamment d'importance à l'association mémoire de travail – mémoire à long terme (avec en particulier la base de connaissances sur le monde des apprenants, mobilisable au moment de l'apprentissage à partir d'un environnement complexe fondé sur du matériel développé en relation avec ce qui existe dans leur entourage social, technologique, professionnel ou encore personnel).

Lors de la conception d'environnements d'apprentissage, il faut, nous semble-t-il, trouver un équilibre dans une zone proximale d'apprentissage qui, par rapport au noyau de connaissance des apprenants, propose une difficulté suffisante mais contrôlée (théorie des « *desirable difficulties* ») pour les engager dans la situation (proposer de la complexité) mais ne pas les mettre en surcharge attentionnelle et mnésique (théorie de la charge cognitive) en proposant des aménagements temporaires comme des stratégies de présentation en deux étapes.

La poursuite des travaux présentés dans cette thèse pourrait se situer à deux niveaux.

Un premier niveau avec des recherches sur la mesure rationnelle du niveau de complexité des environnements d'apprentissage afin de mieux contrôler les niveaux de complexité du matériel utilisé dans nos expériences. Un deuxième niveau, avec des recherches sur la mise en œuvre d'un système de mesure « *on line* » de l'activité cognitive des participants par des mesures de temps d'étude et d'effort mental afin d'obtenir des données pour approfondir les résultats obtenus et, en particulier, examiner plus précisément ce qui permettrait, pour des développeurs d'environnement d'apprentissage, de choisir entre une approche du tout vers les parties avec les parties en total isolement et une approche des parties vers le tout avec les parties partiellement isolées. En effet, nous avons bien montré que, dans ces deux cas, l'apprentissage était meilleur mais la rigueur de nos études doit nous permettre de prescrire une ou l'autre de ces approches en fonctions des caractéristiques des apprenants.

Références bibliographiques

Aublin, M. & Teraud, D. (2005). Réflexion sur les centres d'intérêt en didactique des STI. *Technologie & Formation*, 123, 18-26

Ally, M. (2004). Foundations of educational theory for online learning. In T. Anderson & F. Elloumi (Eds), *Theory and Practice of Online learning* (pp 1-31). Athabasca: Athabasca University.

Ambrose, S., Bridges, M., Lovett, M., DiPietro, M. & Norman, M. (2010). *How learning works: 7 research-based principles for smart teaching*. San Francisco, CA: Jossey Bass.

Anderson, J. R. (1976). *Language, memory and thought*. Hillsdale, NJ: Erlbaum Associates.

Anderson, J. R. (1983). *The architecture of cognition*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

Anderson, J. R. (1995). *Learning and memory : An integrated approach*. New York : John Wiley & Sons Inc.

Anderson, L.W., Krathwohl D.R., Airasian, P.W., Cruikshank, K.A., Mayer, R.E., Rath, J., & Wittrock, M.C. (2001). *A taxonomy for learning, teaching, and assessing : A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives*. New York : Longman.

Anderson, J.R., Farrell, R. & Sauers, R. (1984). Learning to programme in LISP. *Cognitive Science*, 8, 87-129

Atkinson, R.C. & Shiffrin, R.M. (1968). Human memory: A proposed system and its control processes. In K.W. Spence & J.T. Spence (Eds.), *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory*. Vol. 2, (pp. 742-775). New York:

Academic Press.

Ayres, P. (2006). Impact of reducing intrinsic cognitive load on learning in a mathematical domain. *Applied Cognitive Psychology*, 20, 287-298.

Baddeley, A. D. (1986). *Working memory*. Oxford: Oxford University Press.

Baddeley, A.D. (1998) Mémoire de travail. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences Paris, Sciences de la vie*, 321, 167-173.

Baddeley, A. D. (2000). The episodic buffer: A new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 417-423.

Baddeley, A. D. & Hitch, G. J. (1974). Working memory. In G. H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation Vol. 8*, (pp. 47–89). New York: Academic Press.

Baddeley, A. D. & Hitch, G. (2000). Development of working memory: Should the Pascual-Leone and Baddeley and Hitch models be merged? *Journal of Experimental Child Psychology*, 77, 128-137.

Baddeley, A. D. & Longman, D. J. A. (1978). The influence of length and frequency of training session on the rate of learning to type. *Ergonomics*, 21, 627-635.

Bandura, A. & Locke, E. A. (2003). Negative self-efficacy and goal effects revisited. *Journal of Applied Psychology*, 88, 87–99.

Bandura A. (2007). *Auto-efficacité : Le sentiment d'efficacité personnelle « Self-efficacy »*. Paris : De Boeck.

Barrett, L. F., Tugade, M. M. & Engle, R. W. (2004). Individual differences in working memory capacity and dual-process theories of the mind. *Psychological Bulletin*, 130, 553-573.

Barrouillet, P. & Camos, V. (2007). The time based resource sharing model of working memory. In N. Osaka, R. Logie, & M. D'Esposito (Eds.), *Working memory: Behavioral and neural correlates* (pp. 59-80). Oxford: Oxford University Press.

Barlett, F.C. (1932). *Remembering: An experimental and social study*. Cambridge: Cambridge University Press.

Bernier, C. (1990). *Le travail en mutation*. (Institut de recherche appliquée sur le travail), Montréal : Éditions Saint-Martin

Bétrancourt, M. & Caro, S. (1998). Intégrer des informations en escamots dans les textes techniques : quels effets sur les processus cognitifs ? In A. Tricot & J.-F. Rouet (Eds.), *Les hypermédias : approches cognitives et ergonomiques* (pp. 157-173). Paris: Hermès.

Bicknell-Holmes, T., & Seth Hoffman, P. (2000). Elicit, engage, experience, explore: discovery learning in library instruction. *Reference Services Review*, 28(4), 313-322.

Binet A. (1894). *Psychologie des grands calculateurs et joueurs d'échecs*, Paris: Hachette.

Bjork, E. L. & Bjork, R. A. (2011). Making things hard on yourself, but in a good way: Creating desirable difficulties to enhance learning. In M. A. Gernsbacher, R. W. Pew, L. M. Hough & J. R. Pomerantz (Eds.), *Psychology and the real world: Essays illustrating fundamental contributions to society* (pp. 56-64). New York: Worth Publishers.

Blayney, P., Kalyuga, S. & Sweller, J. (2010). Interactions between the isolated–interactive elements effect and levels of learner expertise: Experimental evidence from an accountancy class. *Instructional Science*, 38, 277-287.

Borun, M., Massey, C. & Lutter, T., (1992) *Naïve knowledge and the design of science museum exhibits*. Philadelphia: Franklin Institute Science Museum.

Bourgeois, E. & Chapelle, G. (2007). *Apprendre et faire apprendre*. Paris : P.U.F.

Brousseau, G. (2008). *Premières notes sur l'observation des pratiques de classe*. En ligne : < http://visa.inrp.fr/visa/resau/seminaires/journees_inaugurales-14-et-15-mai-2009-1/premieres-notes-sur-lobservation-des-pratiques-de-classe>.

Brown, J. S., Collins, A. & Duguid, P. (1989). Situated cognition and the culture of learning. *Educational researcher*, 18, 32-42.

Bruner, J. (1966). *Toward a Theory of Instruction*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

Case, R. (1985). *Intellectual development: Birth to adulthood*. New York: Academic Press.

Catrambone, R. (1998). The subgoal learning model: Creating better examples so that students can solve novel problems. *Journal of Experimental Psychology: General*, 127, 355-376.

Chanquoy, L., Tricot, A. & Sweller, J. (2007). *La charge cognitive*. Paris : A. Colin.

Chevallard, Y. (2009). La notion d'ingénierie didactique, un concept à refonder. Questionnement et éléments de réponse à partir de la TAD. *Cours donné à la 15^{ème} école d'été de didactique des mathématiques*, Clermont Ferrand, 16-23 août.

Chi, M. T., Glaser, R. & Rees, E. (1982). Expertise in problem solving. In R. J. Stemberg (Ed.), *Advances in the psychology of human intelligence* (pp. 7-77). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Chi, M. T. & Wylie, R. (2014). The ICAP framework: Linking cognitive engagement to active learning outcomes. *Educational Psychologist*, 49, 219-243.

Chinn, C. A. & Brewer, W. F. (1998). An empirical test of a taxonomy of responses to anomalous data in science. *Journal of Research in Science Teaching*, 35, 623-654.

Clarebout, G. & Elen, J. (2007). In search of pedagogical agents' modality and dialogue

effects in open learning environments. *E-Journal of Instructional Science and Technology*, 10, 1.

Clarebout, G., Elen, J., Johnson, W. L. & Shaw, E. (2002). Animated pedagogical agents: An opportunity to be grasped? *Journal of Educational Multimedia and Hypermedia*, 11, 267-286.

Clark, C. M., & Bjork, R. A. (2014). When and why introducing difficulties and errors can enhance instruction. In V. A. Benassi, C. E. Overson, & C. M. Hakala (Eds.), *Applying the Science of Learning in Education: Infusing psychological science into the curriculum*. Retrieval from the Society for the Teaching of Psychology web site: <http://teachpsych.org/ebooks/asle2014/index.php>

Clark, R.C. & Mayer, R.E. (2003). *E-learning and the Science of Instruction*. San Francisco: Pfeiffer.

Clarke, T., Ayres, P. & Sweller, J. (2005). The impact of sequencing and prior knowledge on learning mathematics through spreadsheet applications. *Educational Technology, Research and Development*, 53, 15–24.

Cohen, N. J. & Squire, L. R. (1980). Preserved learning and retention of pattern analyzing skill in amnesia: Dissociation of knowing how and knowing that. *Science*, 210, 207–209.

Collins, A., Greeno, J. G. & Resnick, L. B. (1994). Learning environments. In T. Husen & Postlethwaite (Eds.) *International encyclopedia of education* (2nd ed.). Oxford: Pergamon.

Corbin, L. & Camos, V. (2013). L'entraînement de la mémoire de travail et les apprentissages scolaires. *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant*. – ANAE, 123, 113-119.

Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, 24, 87–185.

Craik, F.I.M. & Ijuckhart. R.S. (1972). Levels of processing: A framework for memory research. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 2, 671-684.

Curtin S., Mintz T. H. & Christiansen M. H. (2005). Stress changes the representational landscape: Evidence from word segmentation. *Cognition*, 96, 233-262.

Day, S. B. & Goldstone, R. L. (2012). The import of knowledge export: Connecting findings and theories of transfer of learning. *Educational Psychologist*, 47, 153-176.

Daneman, M. & Carpenter, P. A. (1980). Individual differences in working memory and reading. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 19, 450 - 466.

De Groot, A. (1965). *Thought and choice in chess*. The Hague, The Netherlands: Mouton. (Original work published 1946).

De Ribaupierre, A. (2001). Working memory and attentional processes across the lifespan. In P. Graf & N. Otha (Eds.), *Lifespan development of human memory* (pp. 59-80). Cambridge: MA: MIT Press.

De Saussure, F. (1931). *Cours de linguistique générale*. (3e éd. Corrigée) Paris : Payot.

Deci, E. & Ryan, R. (2002). *Handbook of self-determination research*. Rochester, NY: University of Rochester Press.

Decomps, B. (2001). Technologie et philosophie : Les pistes d'une alliance d'objectifs. Colloque de L'ACIREPH (27 et 28 octobre 2001). Mis en ligne avec l'aimable autorisation de Bernard Decomps et du président de l'ACIREPH. CNDP - Lycée / Philosophie - Mag Février 2002.

De Corte, E. (2003). Transfer as the productive use of acquired knowledge, skills, and motivations. *Current Directions in Psychological Science*, 12, 142-146,

Deforge, Y. (1985). *Technologie et génétique de l'objet industriel*. Paris : Maloine.

- Dehaene, S. (2013). Les quatre piliers de l'apprentissage, ou ce que nous disent les neurosciences. Paristech Review. www.paristechreview.com/2013/11/07/apprentissage-neurosciences/
- Dempster, F. N. (1988). The spacing effect: A case study in the failure to apply the results of psychological research. *American Psychologist*, 43, 627-634.
- Dennen, V.P. & Branch, R.C. (1995). Considerations for designing instructional virtual environments. *Selected readings from the Annual Conference of the International Visual Literacy Association*, Chicago, October 18-22.
- Delannoy, C. (2007). *Une mémoire pour apprendre*. Paris : Hachette Education.
- Dessus, P. (2006). Quelles idées sur l'enseignement nous révèlent les modèles d'Instructional Design ? *Revue Suisse des Sciences de l'Éducation*, 28, 137–157.
- Dessus, P. (2010). Des théories psychologiques pour guider le design pédagogique. In B. Charlier, & F. Henri (Eds.), *Apprendre avec les technologies* (pp. 95–107). Paris : P.U.F., coll. Apprendre.
- Diemand-Yauman, C., Oppenheimer, D. M. & Vaughan, E. B. (2010). Fortune favors the bold (and the italicized): Effects of disfluency on educational outcomes. *Cognition*, 118, 111–115.
- diSessa, A. A. (1993). Toward an epistemology of physics. *Cognition and Instruction*, 10, 105- 225.
- diSessa, A. A. (2006). A history of conceptual change research: Threads and fault lines. In K. Sawyer (Ed.), *Cambridge handbook of the learning sciences*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Douglas, M. (2004). *Comment pensent les institutions* (A. Abeillé, Trans.). Paris: La découverte.

Dunbar, K. (2002). The curriculum. In A.K. Mishra & J. Bartram, (Eds.), *Skills development through distance education* (pp. 31-39). Vancouver : Commonwealth of Learning.

Dweck, C.S. & Molden, D.C. (2005). Self-Theories: Their impact on competence motivation and acquisition. In A. Elliot & C.S. Dweck (Eds.), *The handbook of competence and motivation* (pp. 122-140). New York: Guilford.

Elen, J., & Clarebout, G. (2001). An invasion in the classroom: Influence of an ill-structured innovation on instructional and epistemological beliefs. *Learning Environments Research*, 4, 87-105.

Efklides, A. (2011). Interactions of metacognition with motivation and affect in self-regulated learning: The MASRL model. *Educational Psychologist*, 46, 6-25.

Ericsson, K.A. & W. Kinch. 1995. Long-Term Memory. *Psychological Review*, 102, 211-245.

Feltovich, P. J., Coulson, R. L. & Spiro, R. J. (2001). Learners' understanding of important and difficult concepts: A challenge to smart machines in education. In P. J. Feltovich & K. Forbus (Eds.), *Smart machines in education* (pp. 349-375). Cambridge, MA: MIT Press.

Florin, A. & Vrignaud, P. (2007). *Réussir à L'école : les effets des dimensions conatives en éducation*. Rennes : Presses universitaires de Rennes.

Fortin, M.F. (1996). *Le processus de recherche, de la conception à la réalisation*. Quebec : Décarie.

Frick, T., Chadha, R., Watson, C. & Zlatkovska, E. (2010). Improving course evaluations to improve instruction and complex learning in higher education. *Educational Technology Research and Development*, 58, 115-136.

Gagné, R. M. (1968). Contributions of learning to human development. *Psychological Review*, 75, 177–191.

Gagne, R. (1985). *The Conditions of learning* (4th.). New York: Holt, Rinehart & Winston.

Gallwey, W. T. (1974). *The inner game of tennis* (1st ed.). New York: Random House

Garavan, H. (1998). Serial attention within working memory. *Memory & Cognition*, 26, 263-276..

Garfield, J., delMas, R. & Chance, B. (2007). Using students' informal notions of variability to develop an understanding of formal measures of variability. In M. Lovett & P. Shah (Eds.), *Thinking with data* (pp. 117-148). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Gavens, N., & Camos, V. (2006). La mémoire de travail : une place centrale dans les apprentissages scolaires fondamentaux. In E. Gentaz & P. Dessus (Eds.), *Apprentissages et enseignement : Sciences cognitives et éducation* (pp. 91-106). Paris : Dunod.

Geary, D. C. (2008). An evolutionarily informed education science. *Educational Psychologist*, 43, 279-295.

Georgiou, I., Zahn, C. & Meira, B. J. (2008). A systemic framework for case-based classroom experiential learning. *Systems Research and Behavioral. Science*, 6, 807–819.

Gerjets, P., Scheiter, K. & Catrambone, R. (2006). Can learning from modular worked examples be enhanced by providing instructional explanations and prompting self-explanations? *Learning and Instruction*, 16, 104-121.

Gick, M.L. & Holyoak, K.J. (1983). Schema induction and analogical transfer. *Cognitive Psychology*, 15, 1- 38.

Gobert, T. (2003). *Qualification des interactions observables entre l'homme et les*

machines dotées d'interfaces à modalités sensibles. Lille : Septentrion.

Gobet, F., Lane, P.C.R., Croker, S., Cheng, P.C.H., Jones, G. Oliver, I. & Pine, J.M. (2001). Chunking mechanisms in human learning. *Trends in Cognitive Sciences*, 5, 236-243.

Gobet, F. & Clarkson, G. (2004). Chunks in expert memory: Evidence for the magical number four...or is it two? *Memory* 12, 732-747.

Gobet, F. (2000). Some shortcomings of long-term working memory. *British Journal of Psychology*, 91, 551-570.

Goel, A. K., Rugaber, S., & Vattam, S. (2009). Structure, behavior, and function of complex systems: The structure, behavior, and function modeling language. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 23, 23-35.

Gombert, J. E. (2002). La problématique de la formation autour du principe alphabétique. *Les journées de l'ONL*, p. 13-26

Good, T.L & Brophy, J.E. (1990). *Educational Psychology: A realistic approach* (4th Ed) White Plains, NY: Longman

Gopnik, A. & Wellman, H. M. (1994). The theory theory. In L. A. Hirschfeld & S. A. Gelman (Eds.), *Mapping the mind: Domain specificity in cognition and culture* (pp. 257-293). New York: Cambridge University Press,

Grabner, R. H., Stern, E. & Neubauer. A. C. (2007). Individual differences in chess expertise: A psychometric investigation. *Acta Psychologica*, 124, 398-420.

Graf, P. & Schacter, D. L. (1985). Implicit and explicit memory for new associations in normal and amnesic subjects. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 11, 501-518.

Grotzer, T. A. & Sudbury, M. (2000). *Moving beyond underlying linear causal models of*

electrical circuits. Paper presented at the annual conference of the National Association for Research in Science Teaching, New Orleans, LA.

Ginestié, J. & Tricot, A. (2013). Activités d'élèves, activités d'enseignants en éducation scientifique et technologique. *Recherches en Didactique des Sciences et des Technologies*, 8, 9-22.

Guida, A., Tardieu, H. & Nicolas, S. (2009). Mémoire de travail à long terme : quelle est l'utilité de ce concept ? Emergence, concurrence et bilan de la théorie d'Ericsson et Kintsch (1995). *L'Année Psychologique*, 109, 83-122.

Hmelo-Silver, C. E., Duncan, R. G. & Chinn, C. A. (2007). Scaffolding and achievement in problem-based and inquiry learning: A response to Kirschner, Sweller, and Clark (2006). *Educational Psychologist*, 42, 99– 107.

Hmelo-Silver, C. E. & Pfeffer, M. G. (2004). Comparing expert and novice understanding of a complex system from the perspective of structures, behaviors, and functions. *Cognitive Science*, 28, 127-138.

Immelmann, K. (1982). *Dictionnaire de l'éthologie*. Paris : Mardaga.

Inagaki, K. & Hatano, G. (2006). Young children's conception of the biological world. *Psychological Science*, 15, 177-181.

Jacobson, M. J. & Wilensky, U. (2006). Complex systems in education: Scientific and education importance and implications for the learning sciences. *The Journal of the Learning Sciences*, 15, 11-34.

James, W. (1890). *The Principles of Psychology*. American science series advanced course. New York : Holt.

Jocz, J. & Lachapelle, C. (2012). *The Impact of Engineering is Elementary (EiE) on*

Students' Conceptions of Technology. Boston, MA: Museum of Science.

Kalyuga, S. (2011). Informing: A Cognitive Load Perspective. *Informing Science: The International Journal of an Emerging Transdiscipline*, 14, 33-45.

Kalyuga, S., Ayres, P., Chandler, P. & Sweller, J. (2003). The expertise reversal effect. *Educational Psychologist*, 38, 23-31.

Kane, M. J., Hambrick, D. Z., Tuholski, S. W., Wilhelm, O., Payne, T. W. & Engle, R. W. (2004). The generality of working memory capacity: A latent-variable approach to verbal and visuospatial memory span and reasoning. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133, 189– 217.

Karpicke, J.D. & Roediger, H.L., (2008). The critical importance of retrieval for learning. *Science*, 15, 966–968.

Van Dijk, T. A. & Kintsch, W. (1983). *Strategies of discourse comprehension*. New York: Academic Press.

Kirschner, P. A., Sweller, J. & Clark, R. E. (2006). Why minimal guidance during instruction does not work: an analysis of the failure of constructivist, discovery, problem-based, experiential, and inquiry-based learning. *Educational Psychologist*, 41, 75-86.

Kirschner, P. A. & van Merriënboer, J. J. G. (2008). Ten steps to complex learning: A new approach to instruction and instructional design. In T. L. Good (Ed.), *21st Century Education: A Reference Handbook* (pp. 244-253). Thousand Oaks, CA: Sage.

Klahr, D. & Nigam, M. (2004). The equivalence of learning paths in early science instruction: Effects of direct instruction and discovery learning. *Psychological Science*, 15, 661–667.

Klingberg, T. (2010). Training and plasticity of working memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 14, 317-324.

Kole, J. A. & Healy, A. F. (2007). Using prior knowledge to minimize interference when learning large amounts of information. *Memory & Cognition*, 35, 124-137.

Koriat, A. (1997). Monitoring one's own knowledge during study: A cue-utilization approach to judgments of learning. *Journal of Experimental Psychology: General*, 126, 349- 370.

Lachapelle, C. P., Hertel, J. D., Jocz, J. & Cunningham, C. M. (2013). Measuring students' naïve conceptions about technology. Presented at the *NARST Annual International Conference*, Rio Grande.

Lautrey, J. (2008). Les connaissances naïves chez l'enfant. In J. Lautrey, S. Rémi-Giraud, E. Sander & A. Tiberghien (Eds.), *Les connaissances naïves* (pp. 9-56). Paris : Armand Colin.

Leahy, W. & Sweller, J. (2005). Interactions among the imagination, expertise reversal, and elementinteractivity effects. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 11, 266–276.

Lim, J. H. (2006). Effects of part-task and whole-task instructional approaches and learner levels of expertise on learner performance of a complex cognitive task. *Electronic Theses, Treatises and Dissertations*. Paper 4526.

Lockhart, R. S., Craik, F. I. M. & Jacoby, L. L. (1976). Depth of processing, recognition, and recall: Some aspects of a general memory system. In J. Brown (Ed.), *Recall and recognition* (pp. 75-102). London: Wiley.

Loewenstein, J. & Gentner, D. (2005). Relational language and the development of relational mapping. *Cognitive Psychology*, 50, 315–353.

Lohr, L.L. (2000). Designing the instructional interface. *Computers in Human Behavior*, 16, 161-182.

Lugan, J. C. (2006). Lexique de systémique et de prospective. *Conseil Economique et*

McDaniel, M. A., Whetzel, D. L., Schmidt, F. L. & Maurer, S. D. (1994). The validity of employment interviews: A comprehensive review and meta-analysis. *Journal of Applied Psychology*, 79, 599-616.

Mc Namara, D. S., Kintsch, E., Songer, N. B. & Kintsch, W. (1996). Are good texts always better? Text coherence, background knowledge, and levels of understanding in learning from text. *Cognition and Instruction*, 14, 1-43.

Marcus, N., Cooper, M. & Sweller, J. (1996). Understanding instructions. *Journal of Educational Psychology*, 88, 49-63.

Margolinas, C. (2012). Des savoirs à la maternelle. Oui, mais lesquels ? In XXXIX COLLOQUE COPIRELEM.

Margolinas, C. (2014). Connaissance et savoir. Des distinctions frontalières?. In *Sociologie et didactiques: vers une transgression des frontières?* (pp. 16-44). Haute Ecole pédagogique de Lausanne.

Mayer, R. E. (2001). *Multimedia learning*. New York: Cambridge University Press.

Mayer, R. E. (2005). Cognitive theory of multimedia learning. In R.E. Mayer (Ed.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*. New York: Cambridge University Press.

Mayer, R. E., Mathias, A. & Wetzell, K. (2002). Fostering understanding of multimedia messages through pretraining: Evidence for a two-stage theory of mental model construction. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 8, 147-154.

Mayer, R., Mautone, P. & Prothero, W. (2002). Pictorial aids for learning by doing in a multimedia geology simulation game, *Journal of Educational Psychology*, 94, 171-183.

McElree B. (2001). Working memory and focal attention. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 27, 817-835.

MEN, 2008. Programme de technologie au collège. Bulletin officiel spécial n° 6 du 28 août 2008. Ministère de l'Éducation nationale.

MEN, 2013. Arrêté du 1er juillet 2013 relatif au référentiel des compétences professionnelles des métiers du professorat et de l'éducation

MEN, 2012. Programme de l'enseignement de biologie et physiopathologie humaines. Arrêté du 28-12-2011 - J.O. du 13-1-2012.

MEN, 2012. Programme d'économie-droit. Arrêté du 28-12-2011 - J.O. du 14-2-2012

Merrill, M. David, Drake, Leston, D., Lacy, Mark J. Pratt, Jean A. & the ID2 Research Group. (1996). Reclaiming instructional design. *Educational Technology*, 36, 5-7.

Merrill, M. D. (2002). First principles of instruction. *Educational Technology Research and Development*, 50, 43-59.

Metcalf, J. & Kornell, N. (2005). A region of proximal learning model of study time allocation. *Journal of Memory and Language*, 52, 463-477.

Metcalf, J. (2009). Metacognitive judgments and control of study. *Current Direction in Psychological Science*, 18, 159-163

Metcalf, J. (2011). Desirable difficulties and studying in the Region of Proximal Learning. In A. S. Benjamin (Ed.), *Successful remembering and successful forgetting: A Festschrift in honor of Robert A. Bjork* (pp. 259-276). New York: Psychology Press.

Michalski, R.S. (1991). Toward a unified theory of learning: An outline of basics ideas. *Conference on the fundamentals of Artificial Intelligence*. Paris, 1-5 juillet.

Michelene T. H. Chi & Ruth W. (2014) The ICAP Framework: Linking Cognitive Engagement to Active Learning Outcomes, *Educational Psychologist*, 49, 219-243.

Miller, G. A., (1956). « The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information », *Psychological Review*, 63, 81–97.

Morin, E. (1990). *Introduction à la pensée complexe*. Paris : ESF – Seuil.

Morrison, A. & Chein, J. (2011). Does working memory training work? The promise and challenges of enhancing cognition by training working memory. *Psychonomic Bulletin & Review*, 18, 46-60.

Mouchot, C. (2003). *Méthodologie économique*. Paris : Seuil

Musial, M. & Tricot, A. (2008a). Enseigner pour que les élèves apprennent : une évidence ? 1ère Partie. *Technologie - Sciences et techniques industrielles*, 156, 20-27.

Musial, M. & Tricot, A. (2008b). Enseigner pour que les élèves apprennent : une évidence ? 2ème Partie. *Technologie - Sciences et techniques industrielles*, 158, 52-62.

Musial, M., Pradère, F. & Tricot, A. (2011). Prendre en compte les apprentissages lors de la conception d'un scénario pédagogique. *Recherche & Formation*, 68, 15-30.

Musial, M., Pradère, F., & Tricot, A. (2012). L'ingénierie didactique, une démarche pour enseigner rationnellement. *Technologie*, 180, 54-59.

Miyake, A. & Shah, P. (1999). *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control*. New York: Cambridge University Press.

Naylor, J. C. & Briggs, G. E. (1963). Effects of task complexity and task organization on the relative efficiency of part and whole training methods. *Journal Experimental Psychology*, 1-2, 217-224.

Nkambou, R., Delozanne, E. & Frasson, C. (2007). Les Dimensions émotionnelles de l'interaction dans un EIAH. *Revue STICEF*, Vol. (14).

Nicolas, S. (2014). Un siècle d'étude de la mémoire : les hommes et les idées. *Les Cahiers de Framespa*.

Njenga, J.K. (2005). Instructional design process in a web-based learning management system : design, implementation and evaluation issues. *A thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Master of Information Management in the Department of Information Systems, University of the Western Cape*.

Norman, D. A. & Shallice, T. (1986). Attention to action: Willed and automatic control of behavior. In R. J. Davidson, G. E. Schwartz, & D. E. Shapiro (Eds.), *Consciousness and self-regulation: Advances in research and theory* (Vol. 4, pp. 1–18). New York: Plenum.

Ozcinar, Z. (2009). The topic of instructional design in research journals: A citation analysis for the years 1980-2008. *Australasian Journal of Educational Technology*, 25, 559-580.

Paquette, G. (2002). *Modélisation des connaissances et des compétences, pour concevoir et apprendre*. Sainte-Foy, Canada : Presses de l'Université du Québec.

Pascual-Leone, J. & Ijaz, I. (1989). Mental capacity testing as a form of intellectual-developmental assessment. In R. J. Samuda, S. L. Kong, J. Cummins, J. Pascual-Leone, & J. Lewis (Eds.), *Assessment and placement of minority students* (pp. 143–171). Toronto: C. J. Hogrefe.

Pass, F., Renkl, A. & Sweller, J. (2004). Cognitive load theory: Instructional implications of the interaction between information structures and cognitive architecture. *Instructional Science*, 32, 1-8.

Paas, F., van Merriënboer, J. J. G. & van Gog, T. (2011). Designing instruction for the contemporary learning landscape. In K. R. Harris, S. Graham, & T. Urdan (Eds.), *APA educational psychology handbook: Vol. 3. Application to learning and teaching* (pp. 335–357). Washington, DC: American Psychological Association.

Peeck, J., Van Den Bosch, A. B. & Kruepeling, W. (1982). The effect of mobilizing prior knowledge on learning from text. *Journal of Educational Psychology*, 74, 771-777.

Peirce, C.S., (1974). *The Collected Papers of CS. Peirce*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

Peterson, L. & Peterson, M. (1959). Short-term retention of individual verbal items. *Journal of Experimental Psychology*, 58, 193-198.

Piaget, J. (1937). *La construction du réel chez l'enfant*. Neuchâtel : Delachaux & Niestlé.

Pollock, E., Chandler, P. & Sweller, J. (2002). Assimilating complex information. *Learning and Instruction*, 12, 61–86.

Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W. & Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a Scientific Conception: Toward a Theory of Conceptual Change. *Science Education*, 66, 211-227.

Prince, M. & Felder, R.M. (2006). Inductive teaching and learning methods: Definitions, comparisons, and research bases. *Journal of Engineering Education*, 95, 123–38.

Prince, M. & Felder, R. (2007). The many faces of inductive teaching and learning. *Journal of College Science Teaching*, 36, 14–20.

Proctor, R. W. & A. Dutta, (1995). *Skill acquisition and human performance*. Thousand Oaks, CA: Sage

Rao R.P. & Ballard D.H. (1999). Predictive coding in the visual cortex: a functional interpretation of some extra-classical receptive-field effects, *Nature Neuroscience*, 2, 79-87.

Reed, S. K., Dempster, A. & Ettinger, M. (1985). Usefulness of analogous solutions for solving algebra word problems. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory*,

and Cognition, 11, 106-125.

Reigeluth, C. M. (1999a). What is instructional-design theory and how is it changing? In C. M. Reigeluth (Ed.), *Instructional-design theories and models: A new paradigm of instructional theory* (Vol. 2, pp. 5-29). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Roediger, H.L. & Karpicke, J.D. (2006). *The power of testing memory: Implications for educational practice*. Unpublished manuscript, Washington University in St. Louis.

Roediger, H. L. (2003). Reconsidering implicit memory. In J. S. Bowers & C. Marsolek (Eds.), *Rethinking implicit memory* (pp. 3-18). Oxford: Oxford University Press.

Rosnay, J. de. (1975). *Le macroscope : vers une vision globale*. Paris: Seuil.

Roessingh, J. J. M., Kappers, A. M. L. & Koenderink, J. J. (2002). *Transfer between Training of Part-Tasks in Complex Skill Training*, Technical Report No. NLR-TP-2002-646. Amsterdam: National Aerospace Laboratory.

Salden, R. J. C. M., Paas, F. & van Merriënboer, J. J. G. (2006). Personalised adaptive task selection in Air Traffic Control: Effects on training efficiency and transfer. *Learning & Instruction*, 16, 350-362.

Salthouse, T. A. (1990). Working memory as a processing resource in cognitive aging. *Developmental Review*, 10, 101-124.

Schacter, D.L. (2001). *The seven sins of memory: how the mind forgets and remembers*. Boston: Houghton Mifflin Company.

Schneider, M. & Stern, E. (2010). The cognitive perspective on learning: Ten cornerstone findings. In Organisation for Economic Co-Operation and Development (OECD) (Ed.), *The nature of learning: Using research to inspire practice* (pp. 69-90). Paris: OECD.

Schmidt, R.A. & Bjork, R.A. (1992). New Conceptualizations of practice: Common principles in three paradigms suggest new concepts for training. *Psychological Science*,

3, 207-217.

Shallice, T. & E. K. Warrington. (1970). Independent functioning of verbal memory stores: A neuropsychological study. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 22, 261-273.

Shipstead, Z., Redick, T. S. & Engle, R. W. (2010). Does working memory training generalize? *Psychologica Belgica*, 3-4, 245-276.

Shimmerlic, S. M. (1978). Organization theory and memory for prose: A review of the literature. *Retsian of Educational Research*, 48.7A3-120.

Solomonidou, C. & Tassios, A. (2007). A phenomenographic study of Greek primary school students' representations concerning technology in daily life. *International Journal of Technology and Design Education*, 17, 113–133.

Son, L. K. & Simon, D. A. (2012). Distributed learning: Data, metacognition, and educational implications. *Educational Psychology Review*, 24, 379-399.

Son, J. Y., Doumas, L. A. & Goldstone, R. L. (2010). When do words promote analogical transfer? *The Journal of Problem Solving*, 3, 52–92.

Spencer, R. M. & Weisberg, R. W. (1986). Context-dependent effects on analogical transfer. *Memory & Cognition*, 14, 442-449.

Squire, L. R. (2004). Memory systems of the brain: a brief history and current perspective. *Neurobiology of Learning and Memory*, 82, 171-177.

Stagl, J. (1995). *A history of curiosity: the theory of travel, 1550-1800* (Vol. 13). Psychology Press.

Sweller, J. & Chandler, P. (1994). Why some material is difficult to learn. *Cognition and Instruction*, 12, 185-233.

Sweller, J. (1994). Cognitive load theory, learning difficulty and instructional design. *Learning and Instruction*, 4, 295-312.

Sweller, J. (1999). *Instructional design in technical areas*. Melbourne: ACER Press.

Sweller, J. (2004). Instructional design consequences of an analogy between evolution by natural selection and human cognitive architecture. *Instructional Science*, 32, 9-31.

Sweller, J. (2007). Evolutionary biology and educational psychology. In J. S. Carlson & J. R. Levin (Eds.), *Educating the evolved mind: Conceptual foundations for an evolutionary educational psychology*. (pp. 165-175). Greenwich, CT: Information Age Publishing.

Sweller, J., Ayres, P. & Kalyuga, S. (2011). *Cognitive load theory*. New York : Springer

Sweller, J., Van Merriënboer, J. J. G. & Paas, F. (1998). Cognitive architecture and instructional design. *Educational Psychology Review*, 10, 251-296.

Tardif, J. (1992). *Pour un enseignement stratégique. L'apport de la psychologie cognitive*. Montréal : Éditions Logiques.

Teague, R. C., Gittelman, S. S. & Park, O. C. (1994). A review of the literature on part-task and whole-task training and context dependency (Report No. 1010). *Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences*.

Tenenbaum, J. B., Griffiths, T. L. & Kemp, C. (2006). Theory-based Bayesian models of inductive learning and reasoning. *Trends in Cognitive Science*, 10, 309-318.

Tepe, E. (2008). *La complexité : condition de l'apprentissage et de l'enseignement*. Lyon : CEFEDM Rhone-alpes.

Tennyson, R. D. (2010). Historical Reflection on Learning Theories and Instructional

Design. *Contemporary Educational Technology*, 1, 1-16.

Thiétart, R.A. (2000). Management et complexité : concepts et théories. *Cahier n° 282, Centre de Recherche DMSP*.

Tindall-Ford, S., Chandler, P. & Sweller, J. (1997). When two sensory modes are better than one. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 3, 257-287.

Tomasello, M. (2003). *Constructing a language: A usage-based approach to child language acquisition*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

Towse, J. N. & Hitch, G. J. (1995). Is there a relationship between task demand and storage space in tests of working memory capacity ? *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 48A, 108-124.

Tricot, A. & Chanquoy, L. (1996). La charge mentale, « vertu dormitive » ou concept opérationnel? Introduction. *Psychologie Française*, 41, 313-318.

Tricot, A. (1998). Charge cognitive et apprentissage. Une présentation des travaux de John Sweller. *Revue de Psychologie de l'Éducation*, 3, 37-64.

Tricot, A. & Boubée, N. (2007). L'usage des TIC comme situation d'apprentissage implicite : le cas des compétences documentaires. *Les Dossiers de l'Ingénierie Educative. Numéro hors série*, 149-158.

Tricot, A. (2003). IHM, cognition et environnements d'apprentissage. In G. Boy (Ed.), *L'ingénierie cognitive : IHM et cognition* (pp. 411-447). Paris : Hermès Science.

Tricot, A. & Plégat-Soutjis, F. (2003). Pour une approche ergonomique de la conception d'un dispositif de formation à distance utilisant les TIC. *STICEF, Volume 10, 2003, ISSN : 1764-7223*

Tricot, A. (2011). Apprentissages et enseignement. *Médiadoc*, numéro spécial « Apprendre l'info-doc : quelle médiation ? »

Tricot, A. (2012). Utilité, apprentissages et enseignement : une approche évolutionniste. In *Du mot au concept : utilité*. Grenoble : PUG

Trigeassou, J.C., Poinot, T. & Bachir, S. (2009). Parameter estimation for knowledge and diagnosis of electrical machines, *Ouvrage*, vol.(1), 207-243

Trottier, C. (2005). L'analyse des relations entre le système éducatif et le monde du travail en sociologie de l'éducation : vers une recomposition du champ d'études ? *Éducation et Sociétés* n° 16/2005/2

Tulving, E. (1983). *Elements of episodic memory*. (Oxford psychology series N° 2). New York: Oxford University Press.

Unsworth, N., Heitz, R. P., Schrock, J. C. & Engle, R. W. (2005). An automated version of the operation span task. *Behavior Research Methods*, 37, 498–505.

van Merriënboer, J. J. G. & Kirschner, P. A. (2007). *Ten steps to complex learning*. Mahwah, NJ: Erlbaum.

van Merriënboer, J. J. G., Clark, R. E. & de Croock, M. B. M. (2002). Blueprints for complex learning: The 4C/ID-model. *Educational Technology, Research and Development*, 50, 39-64.

van Merriënboer, J. J. G., Kirschner, P. A. & Kester, L. (2003). Taking the load off a learner's mind: Instructional design for complex learning. *Educational Psychologist*, 38, 5–13.

van Merriënboer, J. J. G. & Sweller, J. (2005). Cognitive load theory and complex learning: Recent developments and future directions. *Educational Psychology Review*, 17, 147-177.

van Merriënboer, J. J. G. (2007). Alternate models of instructional design: Holistic design approaches and complex learning. In R. A. Reiser & J. V. Dempsey (Eds.), *Trends and*

issues in instructional design and technology (2nd Ed.) (pp. 72-81). Old Tappan, NJ: Pearson / Merrill-Prentice Hall.

van Merriënboer, J. J. G., Kester, L. & Paas, F. (2006). Teaching complex rather than simple tasks: Balancing intrinsic and germane load to enhance transfer of learning. *Applied Cognitive Psychology*, 20, 343-352.

Van Patten, J., Chao, C. I., & Reigeluth, C. M. (1986). A review of strategies for sequencing and synthesizing instruction. *Review of Educational Research*, 56, 437-471.

Von Bertalanffy, L. (1968). *General system theory: Foundations, development, applications* (Vol. 55). New York: George Braziller.

Vosniadou, S. (2008). *International Handbook of Research on Conceptual Change*. London: Routledge.

Vosniadou, S., Ioannides, C., Dimitrakopoulou, A. & Papademytiou, E. (2001). Designing learning environments to promote conceptual change in science. *Learning and Instruction*, 11, 381-419.

Vosniadou, S. (1994). Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4, 45-69.

Vosniadou, S. (2007). Conceptual change and education. *Human Development*, 50, 47-54.

Westbrook, R.B. (1993). John Dewey. *Perspectives, Revue Trimestrielle d'Education comparée*, 1-2, 277-293.

Wickelgren, W. (1973). The long and the short of memory. *Psychological Bulletin*, 80, 425-438.

Wiener, N. (1948). *Cybernetics*. Paris: Hermann.

Wightman, D. C. & Lintern, G. (1985). Part-task training for tracking and manual control. *Human Factors*, 27, 267-283.

Wilensky, U. & Reisman, K. (2006). Thinking like a wolf, a sheep or a firefly: Learning biology through constructing and testing computational theories an embodied modeling approach. *Cognition & Instruction*, 24, 171-209.

Woloshyn, V. E., Paivio, A. & Pressley, M. (1994). Use of elaborative interrogation to help students acquire information consistent with prior knowledge and information inconsistent with prior knowledge. *Journal of Educational Psychology*, 86, 79-89.

Yeaman, A. R. J. (1989). Resources for improving computerized learning environments. *TechTrends*, 34, 30-33.

Zaromb, F. M., Karpicke, J. D. & Roediger, H. L. (2010). Comprehension as a basis for metacognitive judgments: Effects of effort after meaning on recall and metacognition. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 36, 552-557.

Annexe 1 :

Expérimentation 1

Prétest et post test

Exemples de planche d'étude

Nom :.....

Prénom :.....

Classe :.....

Date:

Attention : pour certaines questions, Il faut cocher plusieurs réponses.

1- Le hertz (noté Hz) est une unité :

- ☐ de fréquence
- ☐ de courant
- ☐ je ne sais pas

2- Un octet est :

- ☐ un mot de 16 bits
- ☐ une adresse relative un mot de 8 bits
- ☐ une adresse absolue
- ☐ je ne sais pas

3- Avec 4 variables binaires, il est possible d'obtenir au maximum :

- ☐ 8 combinaisons
- ☐ 16 combinaisons
- ☐ 4 combinaisons 3
- ☐ 2 combinaisons
- ☐ je ne sais pas

4- La fréquence d'échantillonnage est une mesure :

- ☐ du nombre d'échantillon prélevé durant 1 minute
- ☐ du nombre d'échantillon prélevé durant 1 seconde
- ☐ du nombre de seconde que dure un échantillon
- ☐ du nombre de minute que dure un échantillon
- ☐ je ne sais pas

5- L'échantillonnage d'un son est une opération qui consiste :

- ☐ à prélever une partie du son à intervalles réguliers
- ☐ à donner une valeur numérique au son
- ☐ à ne garder que les sons aigus
- ☐ à ne garder que les sons graves
- ☐ je ne sais pas

6- L'enregistrement numérique de la musique nécessite, dans l'ordre :

- ☐ un échantillonnage puis une quantification `
- ☐ une quantification puis un échantillonnage
- ☐ je ne sais pas

7- La qualité d'un enregistrement sonore dépend de :

- ☐ de la fréquence d'échantillonnage
- ☐ du nombre de bits de quantification
- ☐ du temps de l'enregistrement
- ☐ du type de support de stockage
- ☐ je ne sais pas

8- Un enregistrement numérique réalisé avec une fréquence d'échantillonnage égale à 44 kHz et une quantification avec 8 bits est considéré comme :

- ☐ de basse qualité
- ☐ de moyenne qualité
- ☐ de haute qualité
- ☐ je ne sais pas

9- Pour des enregistrements sonores destinés à des jouets les paramètres retenus sont :

- | | | |
|---|------------------------|--------|
| <input type="checkbox"/> Echantillonnage 44kHz, | Quantification | 16bits |
| <input type="checkbox"/> Echantillonnage 22kHz, | Quantification | 32bits |
| <input type="checkbox"/> Echantillonnage 8 kHz, | Quantification 8 bits | |
| <input type="checkbox"/> Echantillonnage 8 kHz, | Quantification 32 bits | |
| <input type="checkbox"/> je ne sais pas | | |

10- La quantité de bits nécessaire pour réaliser un enregistrement numérique :

- ☐ dépend du temps d'enregistrement
- ☐ dépend du type du microphone utilisé pour l'enregistrement
- ☐ dépend de la capacité du support d'enregistrement
- ☐ je ne sais pas

11- On souhaite enregistrer une séquence musicale avec les paramètres

- ☐ Fréquence d'échantillonnage : 22 kHz
- ☐ Nombre de bits de quantification : 16 bits
- ☐ Stéréo : oui
- ☐ Durée : 1 seconde

Pour calculer l'espace de stockage nécessaire, Il faut faire l'opération suivante :

- ☐ $22000 \times 16 \times 2$
- ☐ $22 \times 1 \times 3600$
- ☐ $22000 \times 2 \times 1$
- ☐ je ne sais pas

12- Pour diminuer le nombre de bits nécessaires à un enregistrement numérique sans dégrader la qualité, il est possible de :

- ☐ diminuer la fréquence d'échantillonnage
- ☐ diminuer le temps d'enregistrement
- ☐ je ne sais pas

13- 2 enregistrements numériques sont réalisés avec les paramètres suivants

Enregistrement n°1

Fréquence d'échantillonnage :	44 kHz
Nombre de bits de quantification :	16 bits
Stéréo :	oui
Durée :	60 minutes

Enregistrement n°2

Fréquence d'échantillonnage :	44 kHz
Nombre de bits de quantification :	8 bits
Stéréo :	oui
Durée :	60 minutes

Ils nécessitent :

- ☐ la même capacité de stockage
- ☐ L'enregistrement n°1 nécessite 2 fois plus de capacité de stockage que l'enregistrement n°2
- ☐ L'enregistrement n°2 nécessite 2 fois plus de capacité de stockage que l'enregistrement n°1
- ☐ je ne sais pas

14- Pour une même qualité, un enregistrement numérique stéréo de 5 minutes demande une capacité de stockage :

- ☐ plus importante qu'un enregistrement mono
- ☐ moins importante qu'un enregistrement mono
- ☐ équivalente à celle nécessaire à un enregistrement
- ☐ mono
- ☐ je ne sais pas

15- 2 enregistrements numériques sont réalisés avec les paramètres suivants :

Enregistrement n°1

Fréquence d'échantillonnage :	22 kHz
Nombre de bits de quantification :	16 bits
Stéréo :	oui
Durée :	60 minutes

Enregistrement n°2

Fréquence d'échantillonnage :	44 kHz
Nombre de bits de quantification :	8 bits
Stéréo :	oui
Durée :	60 minutes

Ils nécessitent :

- ☐ la même capacité de stockage
- ☐ L'enregistrement n°1 nécessite 2 fois plus de capacité de stockage que l'enregistrement n°2
- ☐ L'enregistrement n°2 nécessite 2 fois plus de capacité de stockage que l'enregistrement n°1
- ☐ je ne sais pas

16- Pour un enregistrement numérique, à qualité égale, plus la fréquence d'échantillonnage est élevée plus la capacité de stockage à prévoir est élevée.

- ☐ oui
- ☐ non
- ☐ je ne sais pas

17- A qualité d'enregistrement équivalente, lorsqu'on le nombre de voies d'enregistrement est triplé, la capacité de stockage à prévoir doit être :

- ☐ divisée par trois
- ☐ multipliée par trois
- ☐ égale au cube de la capacité nécessaire pour une voie
- ☐ je ne sais pas

18- une quantification sur 8 bits permet de discerner :

- ☐ 2^8 niveaux possibles
- ☐ 8^2 niveaux possibles
- ☐ 2 x 8 niveaux possibles
- ☐ je ne sais pas

19- La quantification dégrade le son réellement produit par un instrument :

- ☐ oui
- ☐ non
- ☐ je ne sais pas

20- La capacité de stockage à prévoir pour un enregistrement numérique dépend de :

- ☐ de la fréquence d'échantillonnage
- ☐ du nombre de voies d'enregistrement
- ☐ du nombre de bits de quantification
- ☐ du type de support de stockage
- ☐ je ne sais pas

Exemples de planches d'étude

Un exemple de planche pour le TOUT

Enregistrement numérique de la musique

2- De quoi dépend la qualité d'un enregistrement ?

La qualité d'un enregistrement numérique dépend de deux facteurs :

- La fréquence d'échantillonnage (appelé aussi taux d'échantillonnage) : plus celle-ci est grande (c'est-à-dire que les échantillons sont relevés à de petits intervalles de temps) plus le signal numérique sera fidèle à l'original.
- Le nombre de bits sur lequel on code les valeurs (appelé résolution) : il s'agit en fait du nombre de valeurs différentes qu'un échantillon peut prendre. Plus celui-ci est grand, meilleure est la qualité.

Le tableau ci-dessous donne quelques valeurs standards :

Fréquence d'échantillonnage : 44 KHz Nombre de bits : 16 bits Nombre de voies : 2 (stéréo)	Parfait pour des enregistrements de Haute qualité
Fréquence d'échantillonnage : 22 KHz Nombre de bits : 16 bits Nombre de voies : 2 (stéréo)	Convient pour des enregistrements de moyenne qualité
Fréquence d'échantillonnage : 11 KHz Nombre de bits : 8 bits Nombre de voies : 1 (mono)	Utilisé pour des enregistrements de basse qualité (ex : jouets)

Un exemple de planche pour les PARTIES

Enregistrement numérique de la musique

5- L'échantillonnage des signaux

L'échantillonnage consiste à capturer des valeurs d'un signal analogique à intervalle de temps régulier. Cette opération a deux conséquences :

- seules les informations présentes sur les points de capture sont enregistrées ;
- tout le reste est perdu.

La fréquence à laquelle les valeurs sont capturées est la fréquence d'échantillonnage, appelée aussi taux d'échantillonnage, exprimée en Hz.

Par exemple, un CD audio contient des données musicales échantillonnées à 44,1 kHz (44 100 échantillons par seconde), un DVD Audio 48, 96 ou 192 kHz (48 000, 96 000 ou 192 000 échantillons par seconde), un Super Audio CD 2822.4 kHz (2 822 400 échantillons par seconde).

— Signal analogique
— Signal échantillonné

Annexe 2 :

Expérimentation 2

Prétest et post test

Exemples de planches d'étude

Nom :

Prénom :

Date :

Question n°1 :

Regardez le schéma suivant :



Sans apport d'énergie calorifique, la température de l'eau va tendre vers :

- ☐ 0°C
- ☐ 18°C
- ☐ 100°C
- ☐ Je ne sais pas

Question n°2 :

Une sonde de température du type PT100 est constituée d'une résistance égale à :

- ☐ 100 ohm à 0°C
- ☐ 0,1 ohm à 100°C
- ☐ 0,01 ohm à 0°C
- ☐ je ne sais pas

Question n°3 :

Un thermoplongeur est un composant destiné à :

- ☐ fournir de l'énergie calorifique
- ☐ extraire de l'énergie calorifique
- ☐ mesurer la température d'un milieu
- ☐ Je ne sais pas

Question n°4 :

Parmi les 3 schémas suivants, lequel correspond à une boucle de régulation ?

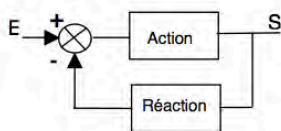


Schéma n°1

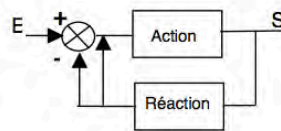


Schéma n°2

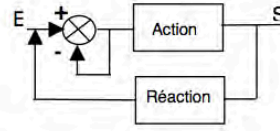
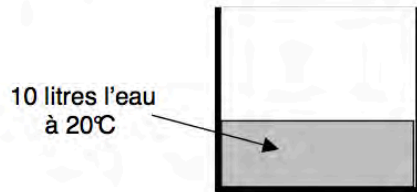


Schéma n°3

- ☐ Le schéma n°1
- ☐ Le schéma n°2
- ☐ Le schéma n°3
- ☐ Je ne sais pas

Question n°5 :

Regardez le schéma suivant :

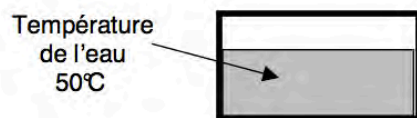


Si on ajoute 10 litres d'eau à 50 °C dans le bac, q uelle va être la température des 20 litres d'eau ?

- ☐ °C
- ☐ Je ne sais pas

Question n°6 :

Regardez le schéma suivant :



Température
ambiante
18°C

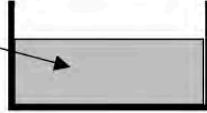
Sans échanges calorifiques possibles avec l'extérieur, la température de l'eau va tendre vers :

- ☐ 0°C
- ☐ 18°C
- ☐ 50°C
- ☐ Je ne sais pas

Question n°7 :

Regardez le schéma suivant :

Température
de l'eau
50°C



Température
ambiante
18°C

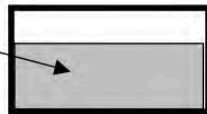
Si la température ambiante augmente instantanément de 5°C,

- ☐ la température de l'eau va augmenter plus vite
- ☐ la température de l'eau va diminuer moins vite
- ☐ la température de l'eau va rester constante
- ☐ Je ne sais pas

Question n°8 :

Regardez le schéma suivant :

Température
de l'eau
15°C



Température
ambiante
15°C

Avec un apport calorifique et sans échanges énergétiques possibles avec l'extérieur, la température de l'eau va tendre vers :

- ☐ 0°C
- ☐ 30°C
- ☐ 100°C
- ☐ Je ne sais pas

Question n°9 :

Une régulation de température dite en « Tout Ou Rien » permet de maintenir une température égale à 0°C ou à 100°C :

- ☐ Vrai
- ☐ Faux
- ☐ Je ne sais pas

Question n°10 :

Un régulateur est l'association :

- ☐ d'un correcteur et d'un modulateur
- ☐ d'un correcteur et d'un comparateur
- ☐ d'une sonde et d'un comparateur
- ☐ Je ne sais pas

Question n°11 :

Regardez le schéma suivant :

Température
de l'eau
50°C



Température
ambiante
18°C

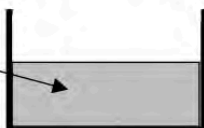
Si la température de l'eau est réglée à 50°C et que la température ambiante devient égale à 10°C,

- ☐ la température de l'eau va rester égale à 50°C
- ☐ la température de l'eau va devenir égale à 18°C
- ☐ la température de l'eau va devenir égale à 10°C
- ☐ Je ne sais pas

Question n°12 :

Regardez le schéma suivant :

60 litres l'eau
régulé à 45°C



Température
ambiante
10°C

Si on ajoute 7,5 litres d'eau à 10 °C dans le bac, quelle va être la température des 67,5 litres d'eau ?

- ☐ la température de l'eau va devenir égale à 10°C
- ☐ la température de l'eau va rester égale à 45°C
- ☐ la température de l'eau va devenir égale à 55°C
- ☐ Je ne sais pas

Nom :

Prénom :

Date :

Question n°1 :

Un thermoplongeur est un composant destiné à :

- ☐ fournir de l'énergie calorifique
- ☐ extraire de l'énergie calorifique
- ☐ mesurer la température d'un milieu
- ☐ Je ne sais pas

Question n°2 :

Parmi les 3 schémas suivants, lequel correspond à une boucle de régulation ?

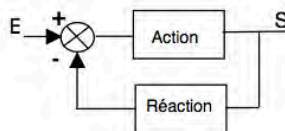


Schéma n°1

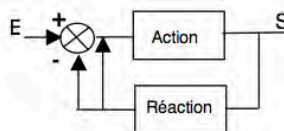


Schéma n°2

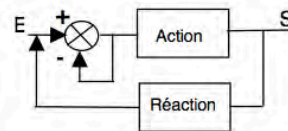


Schéma n°3

- ☐ Le schéma n°1
- ☐ Le schéma n°2
- ☐ Le schéma n°3
- ☐ Je ne sais pas

Question n°3 :

Une régulation de température dite en « Tout Ou Rien » permet de maintenir une température égale à 0°C ou à 100°C :

- ☐ Vrai
- ☐ Faux
- ☐ Je ne sais pas

Question n°4 :

Un régulateur est l'association :

- ☐ d'un correcteur et d'un modulateur
- ☐ d'un correcteur et d'un comparateur
- ☐ d'une sonde et d'un comparateur
- ☐ Je ne sais pas

Question n°5 :

Regardez le schéma suivant :

Température
de l'eau
70°C



Température
ambiante
20°C

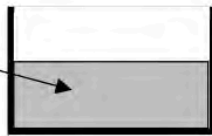
Si la température de l'eau est réglée à 70°C et que la température ambiante devient égale à 10°C,

- ☐ la température de l'eau va rester égale à 70°C
- ☐ la température de l'eau va devenir égale à 20°C
- ☐ la température de l'eau va devenir égale à 10°C
- ☐ Je ne sais pas

Question n°6 :

Regardez le schéma suivant :

30 litres l'eau
régulé à 60°C



Température
ambiante
15°C

Si on ajoute 10 litres d'eau à 10 °C dans le bac, quelle va être la température des 40 litres d'eau ?

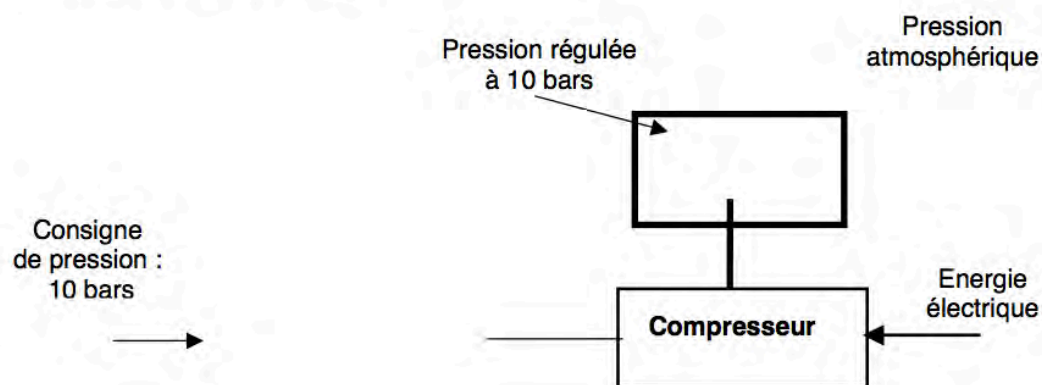
- ☐ la température de l'eau va devenir égale à 15°C
- ☐ la température de l'eau va rester égale à 60°C
- ☐ la température de l'eau va devenir égale à 45°C
- ☐ Je ne sais pas

Question n°7 :

On souhaite obtenir une régulation de pression à 10 bars dans l'enceinte ci-dessous :



Compléter le schéma ci-dessous :



Question n°8 :

Dans le cas d'une régulation de température du type Tout Ou Rien, la puissance de chauffe P peut prendre les valeurs :

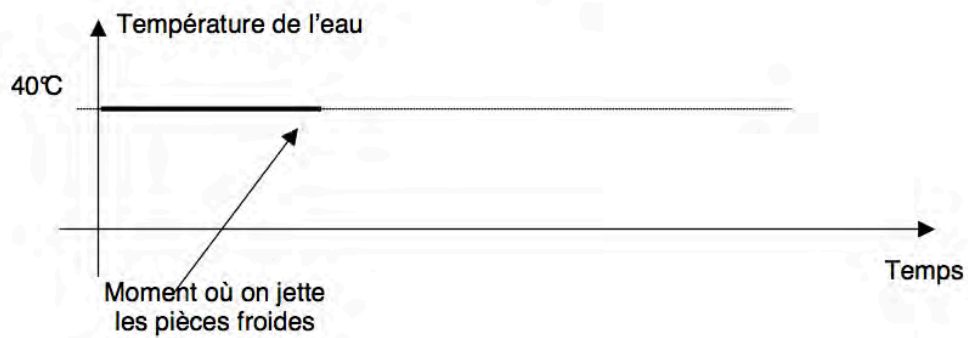
- ☐ uniquement 0 et Pmax
- ☐ évoluer entre 0 et Pmax
- ☐ Je ne sais pas

Question n°9 :

Regardez le schéma suivant :



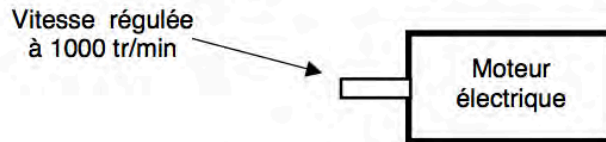
Si la température de l'eau est réglée à 40°C et qu'on y jette des pièces à 15°C, dessinez qualitativement l'évolution de la température de l'eau :



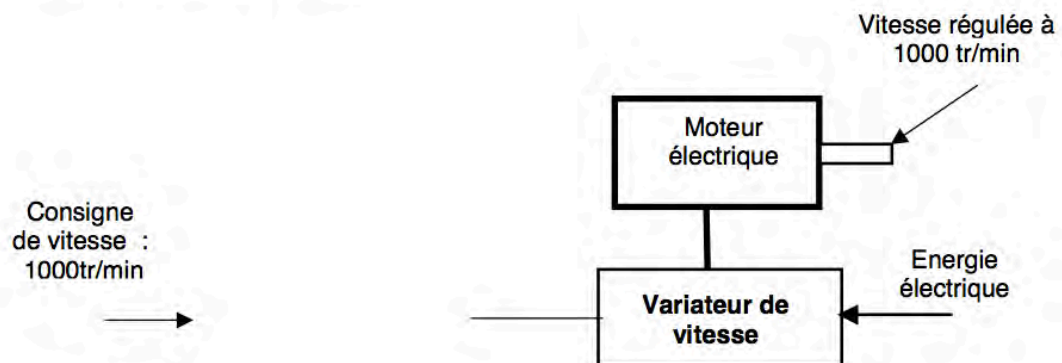
☐ Je ne sais pas

Question n°10 :

On souhaite obtenir une régulation de vitesse à 1000 tr/min pour le moteur ci-dessous :



Compléter le schéma ci-dessous :

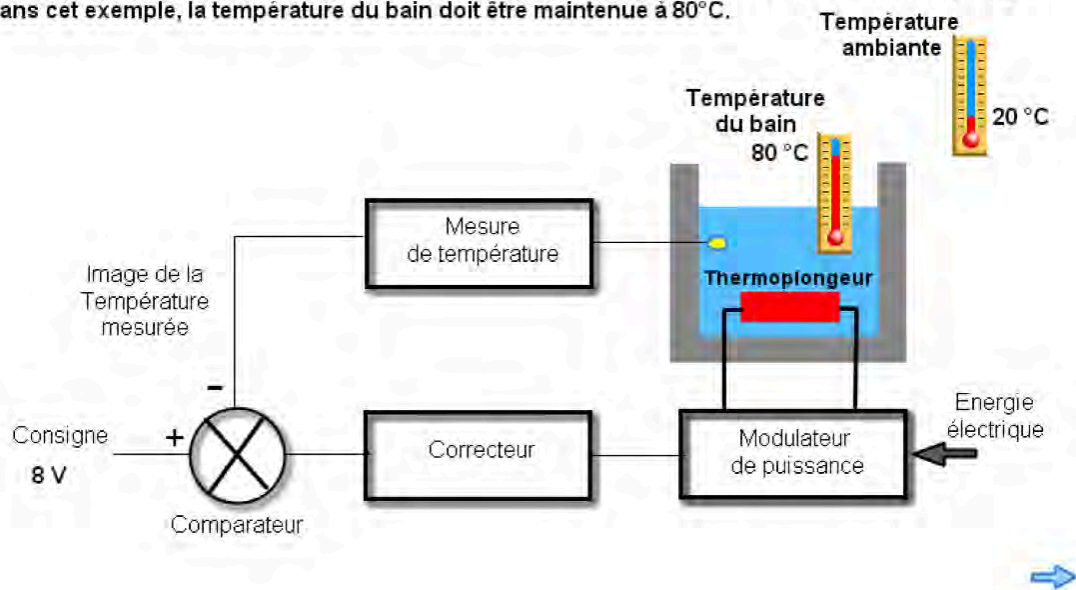


Exemples de planches d'étude

Un exemple pour le TOUT

Présentation d'une solution technique pour assurer la régulation automatique de la température d'un bain pour traitements thermiques

Le schéma ci-dessous présente l'architecture d'une solution de régulation de température. On y retrouve le bain de traitements thermiques entouré d'un ensemble de fonctions de traitement de l'information. On remarquera la présence d'un dispositif de mesure de la température, d'un comparateur, d'un correcteur et d'un modulateur de puissance associé à un thermoplongeur. Dans cet exemple, la température du bain doit être maintenue à 80°C.



Un exemple pour les PARTIES : éléments partiellement isolés

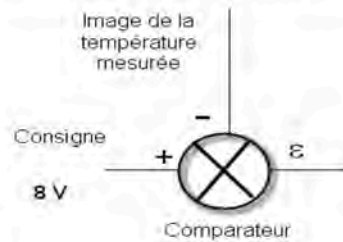
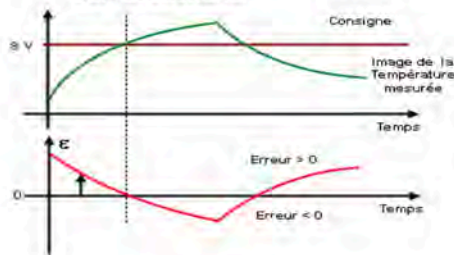
Détection de la différence entre la température de consigne et la température réelle du bain

Pour évaluer la différence entre la température réelle du bain et la température attendue en consigne, un comparateur calcule une valeur appelée erreur sous la forme d'une soustraction entre la consigne et l'image de la température mesurée, soit :

$$\varepsilon = \text{Consigne} - \text{Image de la température mesurée}$$

C'est une information simple à traiter :

- soit l'erreur est positive, ce qui veut dire que la température du bain est inférieure à celle qui est attendue (consigne)
- soit l'erreur est négative, ce qui veut dire que la température du bain est supérieure à celle qui est attendue.



Annexe 3 :

Expérimentation 3

Pré test et post test

Exemples de planche d'étude

Test

Nom :

Prénom :

Date :

Ce test porte sur la motorisation hybride thermique – électrique des véhicules automobiles.

Toutes les questions posées portent sur un véhicule hybride qui circule sur une route horizontale.

Caractéristiques du véhicule hybride

Véhicule

Masse totale : $mT = 1300 \text{ kg}$

Surface de traînée équivalente : $S.C_x : 0,55$

Coefficient de frottement des pneumatiques : $K_r = 0.015$

Rendement de la transmission : 100 %

Moteur hybride

Moteur thermique

Essence, 4 cylindres, 16 soupapes, cycle ATKINSON

Puissance max : 52 kW (70 Cv)

Cylindrée : 1500 cm^3

Courbe d'iso-consommation : voir figure ci-contre

Moteur électrique

Puissance utile max : 33 kW

Batteries

Pmax durant la charge : 15 kW

Energie utilisable : 720 W

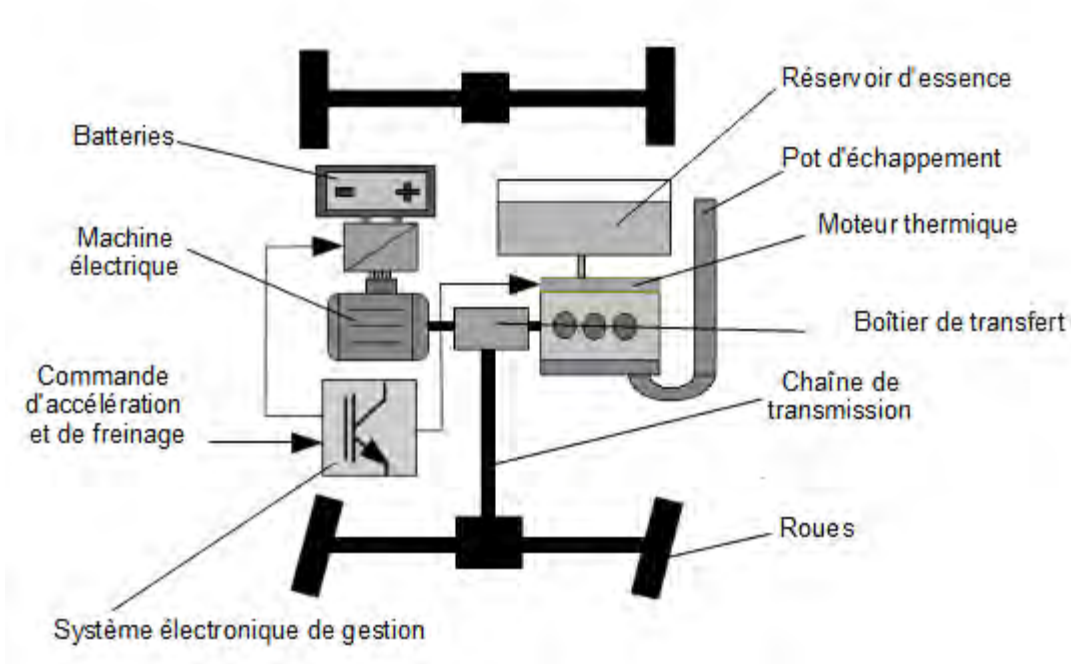
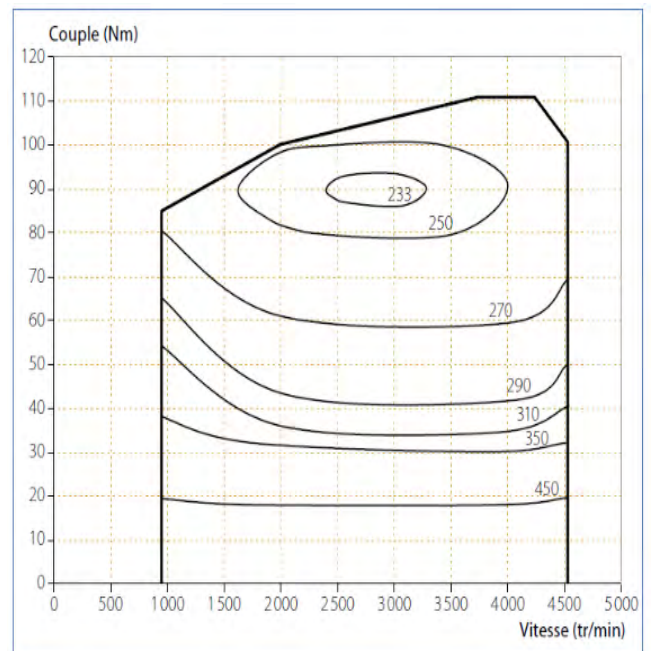
Carburant

Supercarburant

Densité : 0.72

Rejets de CO_2 : 2,28 kg par litre brûlé

Diagramme d'iso-consommation en g/kWh



Consignes

1- Pour répondre aux questions à choix multiple, indiquez votre réponse à l'aide d'une croix dans la case qui correspond à votre choix. Par exemple :

Le mois de juillet est le septième mois de l'année :

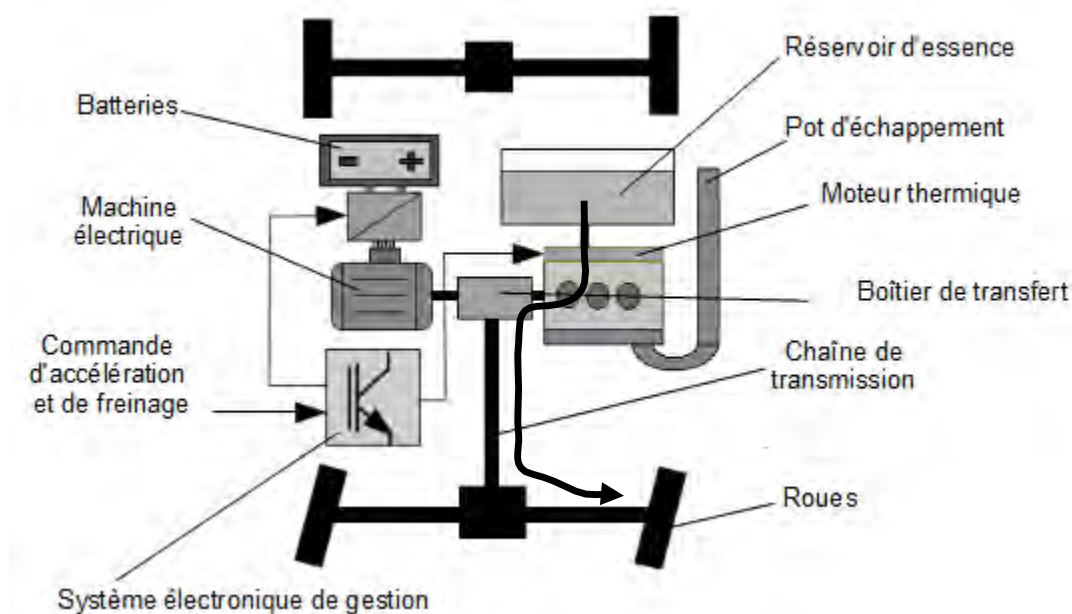
☒ C'est vrai

☐ C'est faux

☐ Je ne sais pas

2- Pour répondre aux questions sur le sens de transfert de l'énergie entre les différents composants de la motorisation hybride, dessinez à main levée un trait continu terminé par une flèche pour indiquer le sens du transfert.

Par exemple : si seul le moteur thermique entraîne les roues, nous aurons :



Questions générales

G-1 Le CO_2 est un composé chimique qui s'appelle :

- ☐ L'oxygène bi-carboné
- ☐ Le dioxyde de carbone
- ☐ Je ne sais pas

G-2 Le CO_2 est un composé chimique qui se forme à partir :

- ☐ de l'oxygène et du carbone contenus dans l'essence
- ☐ du carbone contenu dans l'essence et de l'oxygène présent dans l'air
- ☐ du carbone et de l'oxygène présents dans l'air
- ☐ Je ne sais pas

G3- 1 litre d'essence brûlé rejette :

- ☐ 2,28 kg de CO_2
- ☐ 228 g de CO_2
- ☐ Je ne sais pas

G4- En 2012, Les constructeurs automobiles devront produire des véhicules automobiles qui rejeteront en moyenne :

- ☐ moins de 120 g de CO₂ pour 100 km parcourus
- ☐ plus de 140 g de CO₂ pour 100 km parcourus
- ☐ je ne sais pas

G5- La figure présentée ci dessous est un diagramme d'iso-consommation d'un moteur thermique alimenté par du supercarburant.

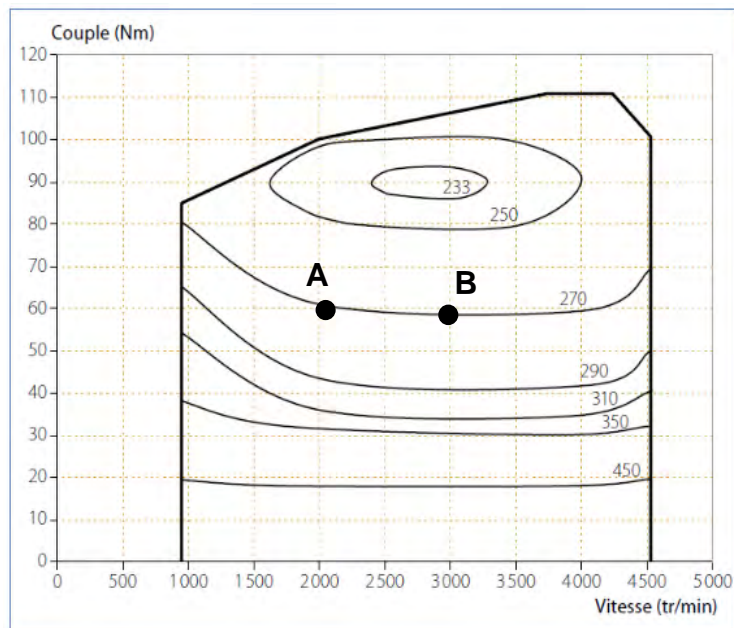


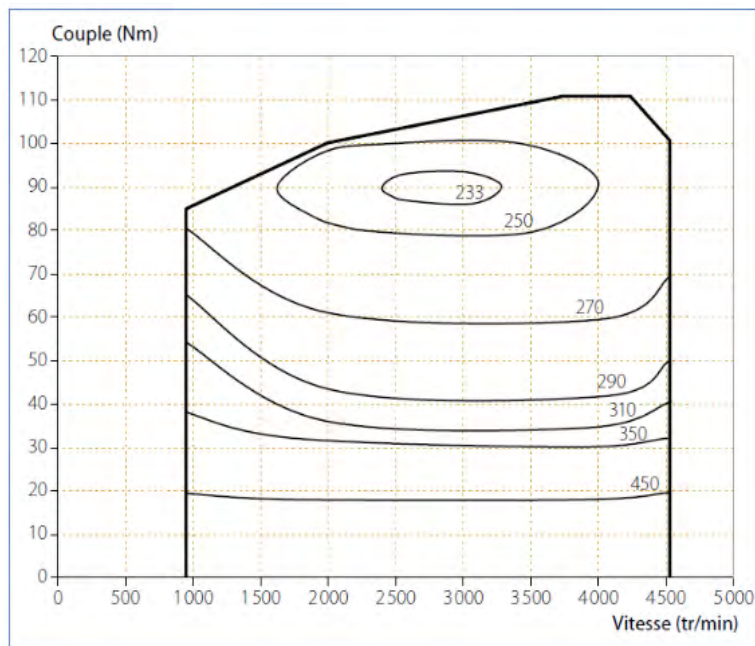
Diagramme d'iso-consommation en g/kWh

Durant 1 heure, le moteur consomme :

- ☐ plus de carburant au point de fonctionnement A qu'au point de fonctionnement B
- ☐ moins de carburant au point de fonctionnement A qu'au point de fonctionnement B
- ☐ autant de carburant au point de fonctionnement A qu'au point de fonctionnement B
- ☐ Je ne sais pas

G6- Sur le diagramme d'iso-consommation présenté ci-dessous, grisez la zone qui correspond aux points de fonctionnement où le rendement du moteur est le meilleur.

Diagramme d'iso-consommation en g/kWh



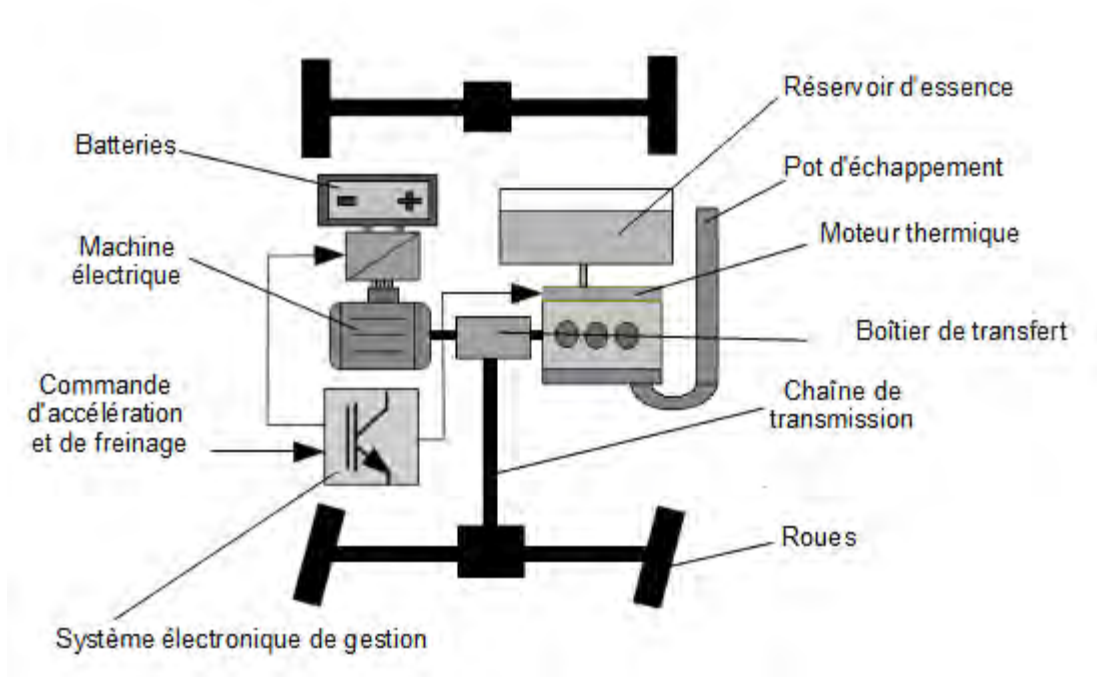
G-7 Une batterie de type Li-PO permet de stocker :

- ☐ de l'énergie électrique
- ☐ de l'énergie mécanique
- ☐ du CO₂
- ☐ Je ne sais pas

Questions sur le démarrage

Le démarrage correspond à la situation où le véhicule est à l'arrêt puis commence à rouler à faible vitesse (20 km/h).

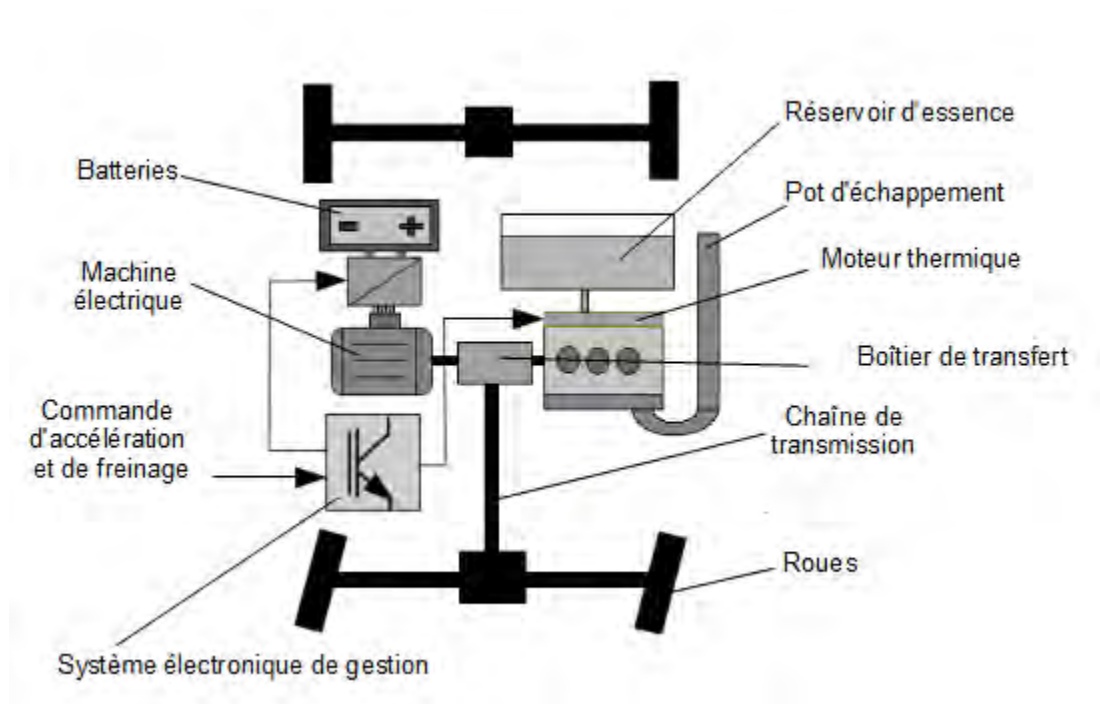
D1- Les batteries sont déchargées et le réservoir d'essence est vide :



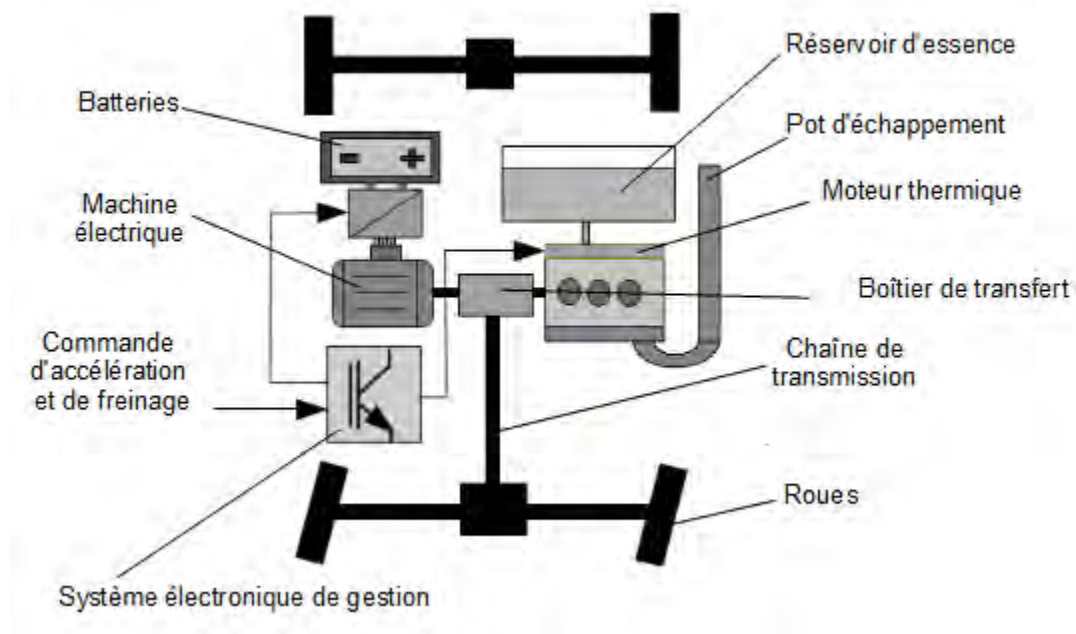
- ☐ Le véhicule peut démarrer
- ☐ Le véhicule ne peut pas démarrer
- ☐ Je ne sais pas

D2- Les batteries sont déchargées et le réservoir d'essence n'est pas vide. Indiquez le sens de transfert de l'énergie quand la voiture commence à rouler.

D3- Les batteries sont chargées et le réservoir d'essence n'est pas vide. Indiquez le sens de transfert de l'énergie quand la voiture commence à rouler.



D4- Les batteries sont chargées et le réservoir d'essence est vide. Indiquez le sens de transfert de l'énergie quand la voiture commence à rouler.



D5- Le réservoir d'essence est vide et les batteries sont chargées au maximum. En phase de démarrage et de déplacement à faible vitesse (20km/h), la puissance nécessaire est de 1200 W.

La durée maximum du déplacement sera égale à :

- ☐ $720 / 1200 = 0,6$ heure
- ☐ $1200 / 720 = 1,7$ heure
- ☐ Je ne sais pas

D6- En situation de démarrage, la motorisation hybride est une réponse aux économies d'émissions de CO₂ car

- ☐ elle permet toujours de démarrer le véhicule en mode électrique
- ☐ elle permet d'éviter le fonctionnement du moteur thermique au ralenti
- ☐ Je ne sais pas

Questions sur le régime de vitesse intermédiaire

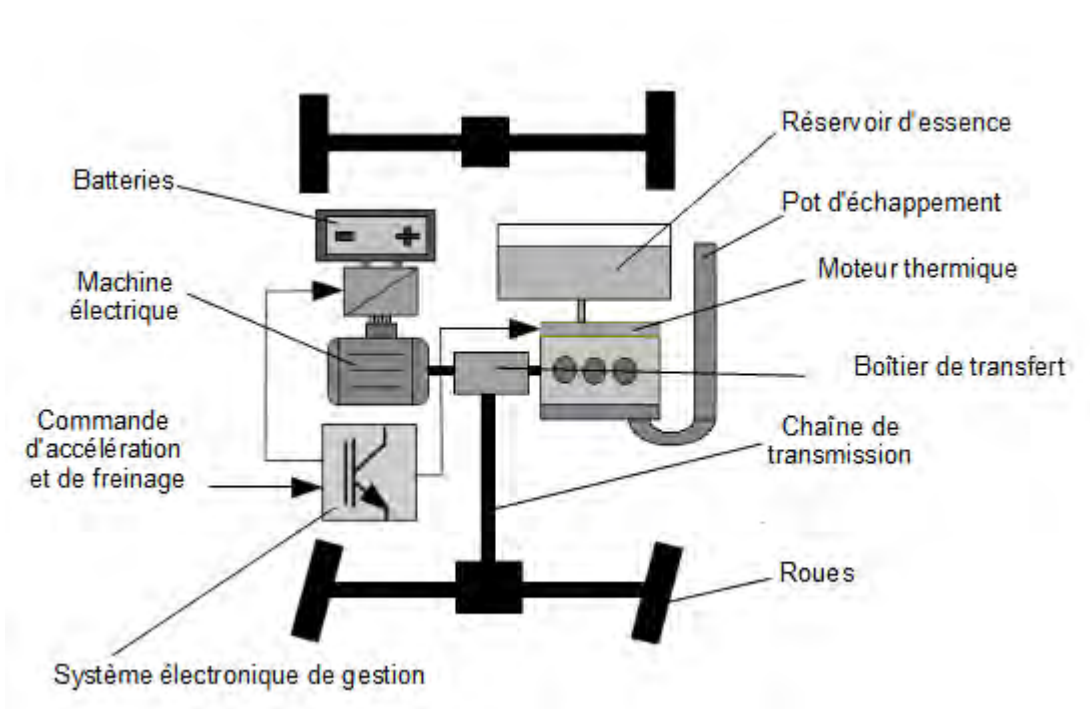
Le régime de vitesse intermédiaire correspond à la situation où le véhicule roule à une vitesse moyenne (80 km/h).

VI1- Quand le réservoir ne contient plus d'essence :

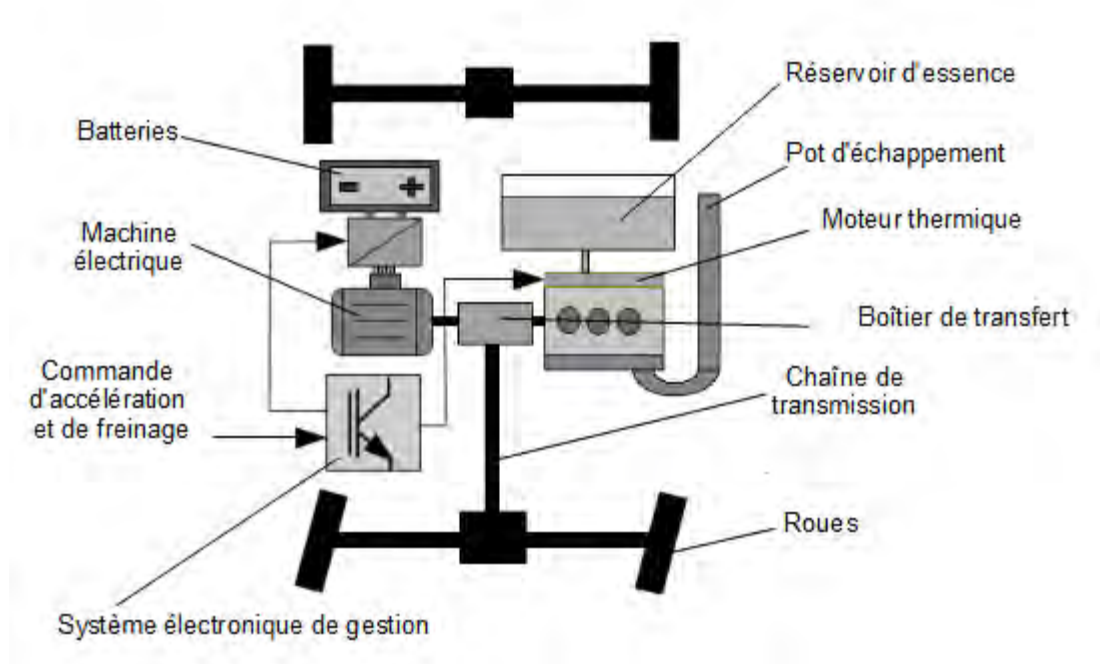
- ☐ Le moteur électrique peut assurer l'entraînement du véhicule de façon permanente
- ☐ La machine électrique entraîne le moteur thermique de façon intermittente
- ☐ Le véhicule possède une autonomie très réduite
- ☐ Je ne sais pas

VI2- Le véhicule roule à vitesse intermédiaire (80 km/h). Indiquez, pour chaque phase, le sens de transfert de l'énergie

Phase 1 : le réservoir d'essence n'est pas vide et les batteries sont chargées



Phase 2 : le réservoir d'essence n'est pas vide et les batteries sont déchargées



VI3- Le véhicule roule à 80 km/h, les batteries sont chargées et le réservoir d'essence vient juste de se vider :

- ☐ Le véhicule s'arrête immédiatement
- ☐ Le véhicule continue de rouler
- ☐ Je ne sais pas

VI4- Le véhicule roule à 80 km/h, les batteries sont déchargées et le réservoir d'essence est vide :

- ☐ Le véhicule s'arrête immédiatement
- ☐ Le véhicule continue de rouler jusqu'à ce que les batteries soient de nouveau chargées
- ☐ Je ne sais pas

VI5- Les batteries sont chargées au maximum (elle stocke 720 Wh). Quand le véhicule roule à 80 km/h, la puissance nécessaire est de 7700 W.

La distance qui peut être parcourue avec l'énergie stockée dans les batteries est :

- ☐ $(720 / 7700) \cdot 80 = 7,4 \text{ km}$
- ☐ $(77 \cdot 80) / 720 = 8,55 \text{ km}$
- ☐ $(0,72 \cdot 77) \cdot 0,08 = 4,43 \text{ km}$
- ☐ Je ne sais pas

VI6- Lorsque le moteur thermique fonctionne à son meilleur rendement, il fournit une puissance égale à 22700 W. Pour entraîner le véhicule à une vitesse de 80 km/h, il faut une puissance égale à 7700 W. La différence de puissance, soit 15 kW, va permettre :

- ☐ de décharger les batteries
- ☐ de recharger les batteries
- ☐ de remplir le réservoir d'essence
- ☐ Je ne sais pas

VI7- En situation de vitesse intermédiaire, la motorisation hybride est une réponse aux économies d'émissions de CO₂ car :

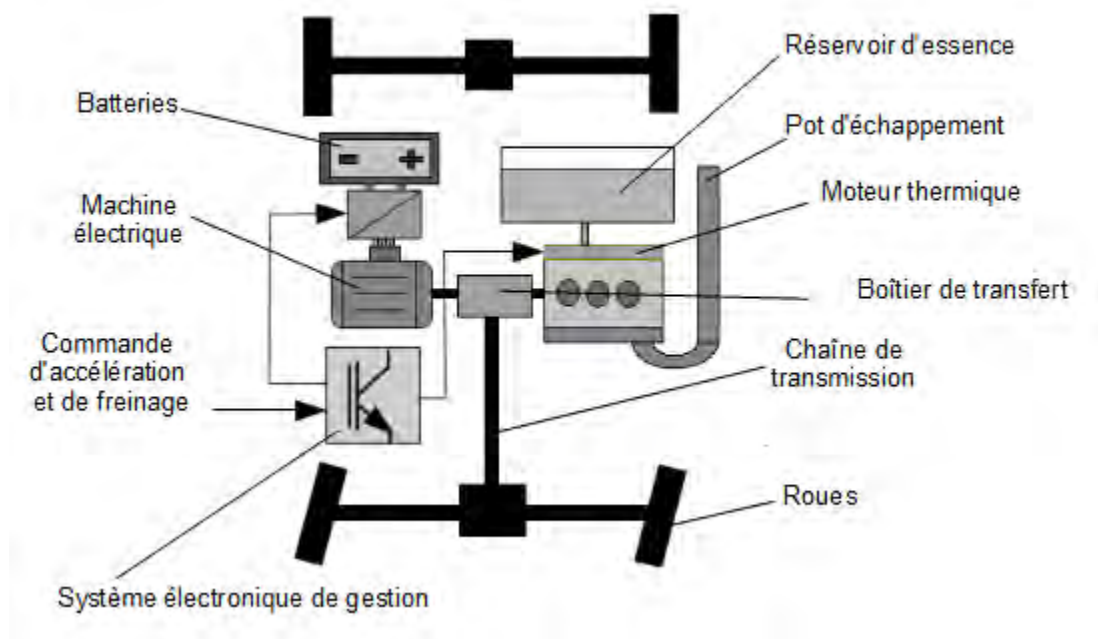
- ☐ elle permet de toujours faire fonctionner le moteur thermique à son meilleur rendement
- ☐ elle permet de ne jamais faire fonctionner le moteur thermique
- ☐ elle permet de ne jamais faire fonctionner la machine électrique
- ☐ Je ne sais pas

Questions sur le régime de freinage non urgent

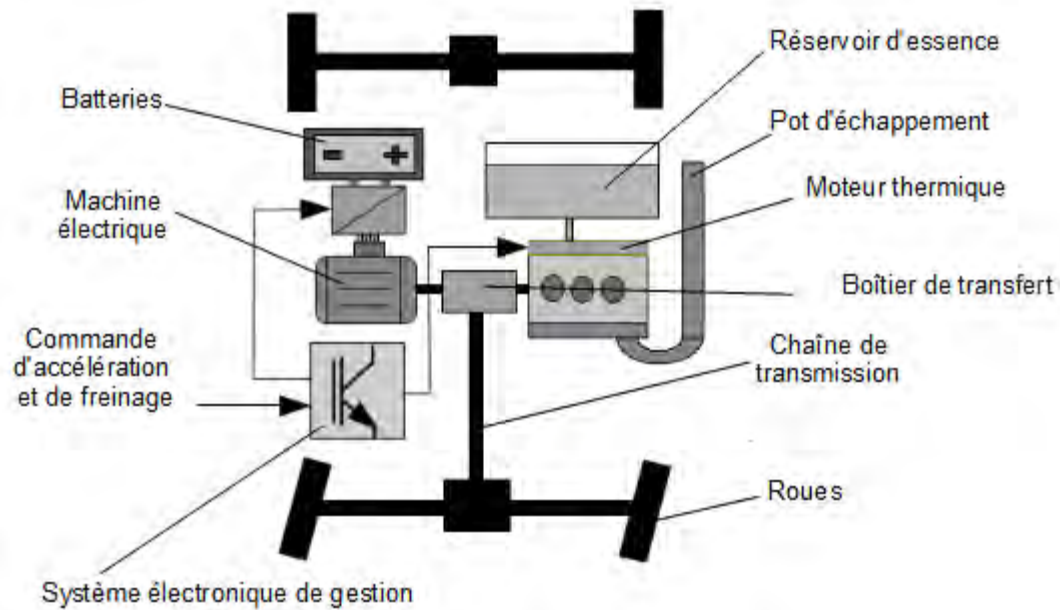
Le régime de freinage non urgent correspond à la situation où le véhicule roule à une vitesse moyenne (par exemple 50 km/h) et ralentie pour s'arrêter à un stop.

FR1- le réservoir d'essence est vide :

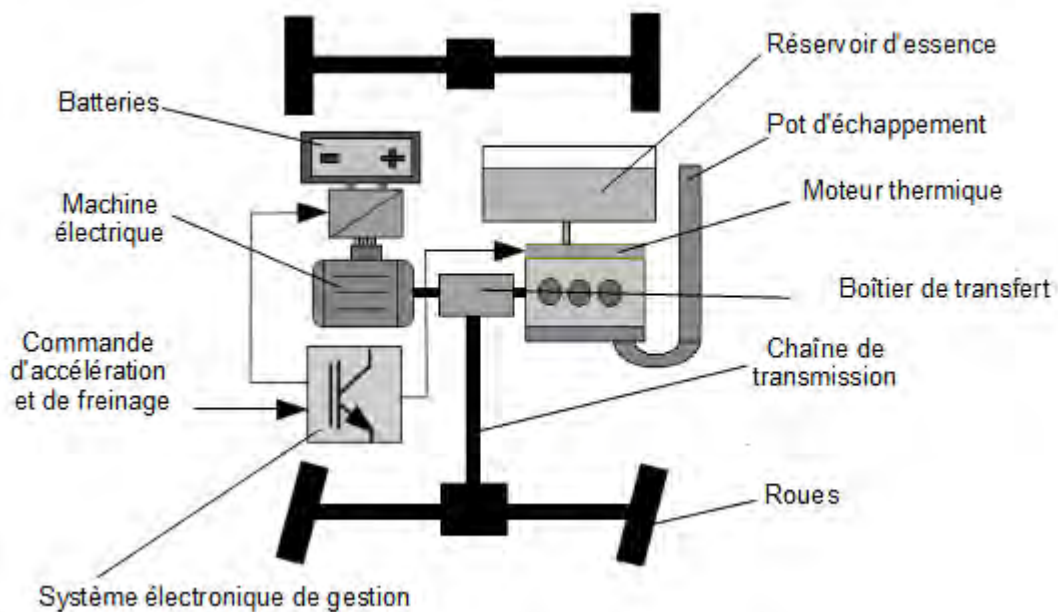
- ☐ Le véhicule peut freiner à l'aide du moteur thermique
- ☐ Le véhicule ne peut pas freiner à l'aide du moteur thermique
- ☐ Je ne sais pas



FR2- Les batteries sont déchargées. Indiquez le sens de transfert de l'énergie quand la voiture commence à freiner.



FR3- Les batteries sont chargées. Indiquez le sens de transfert de l'énergie quand la voiture commence à freiner.



FR4- Le véhicule roule à 50 km/h et s'arrête. L'énergie récupérable E_c se calcule à l'aide de la relation du type :

- ☐ $E_c = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot C_x \cdot V^2$
- ☐ $E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2$
- ☐ $E_c = K_r \cdot m \cdot g \cdot V^2$
- ☐ Je ne sais pas

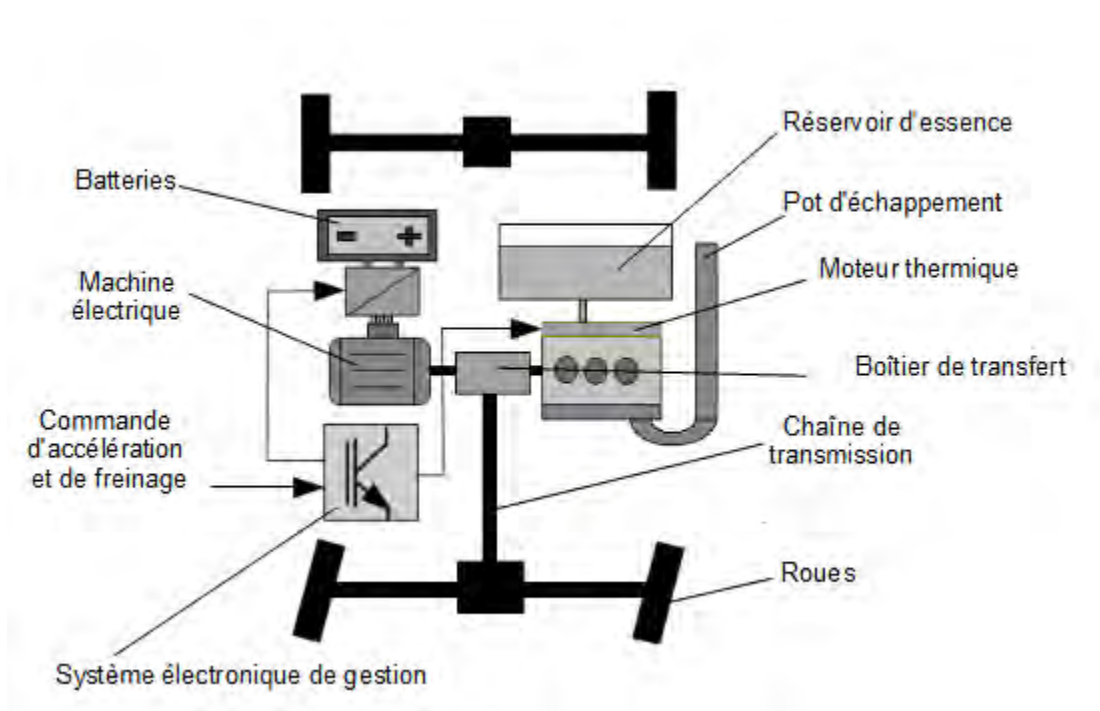
FR5- En situation de freinage non urgent, la motorisation hybride est une réponse aux économies d'émissions de CO₂ car :

- ☐ elle permet d'utiliser plus souvent le frein moteur
- ☐ elle permet de récupérer l'énergie cinétique du véhicule sous forme électrique
- ☐ elle permet de diminuer la quantité d'essence utilisée lors des freinages
- ☐ Je ne sais pas

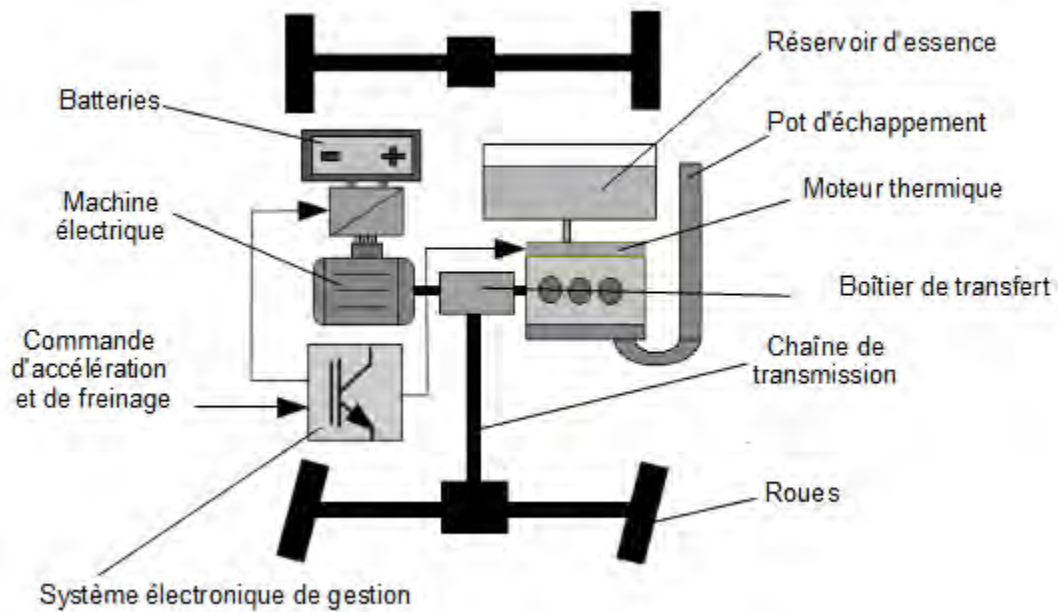
Questions sur le régime de fortes accélérations

Le régime de fortes accélérations correspond à la situation où le véhicule roule à une vitesse moyenne (80 km/h) et augmente rapidement sa vitesse pour doubler un autre véhicule par exemple.

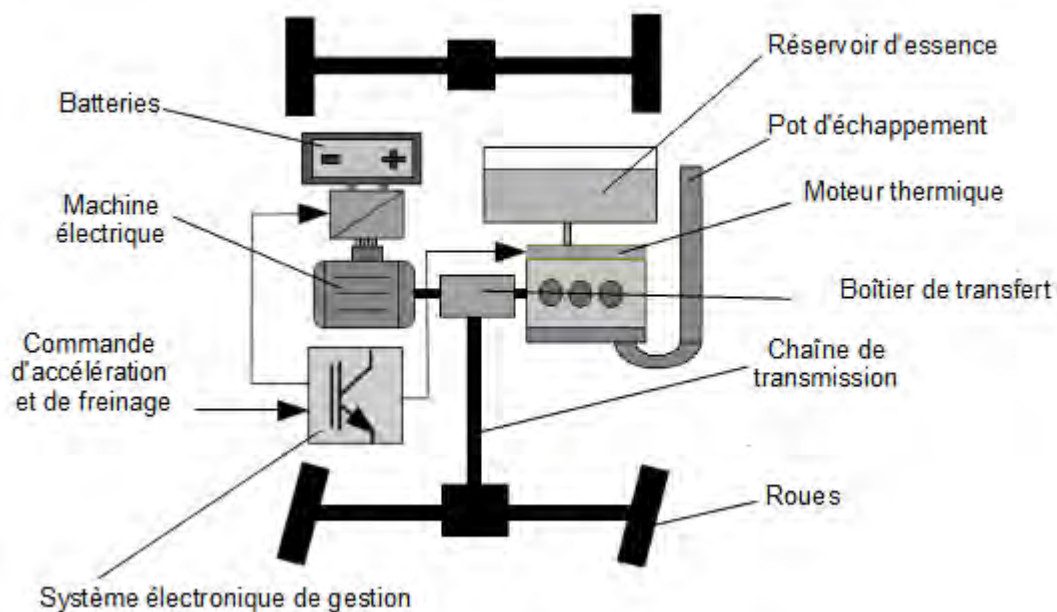
FA-1 Le réservoir d'essence n'est pas vide et les batteries sont déchargées. Indiquez le sens de transfert de l'énergie quand la voiture commence à accélérer.



FA-2 Le réservoir d'essence n'est pas vide et les batteries sont chargées. Indiquez le sens de transfert de l'énergie quand la voiture commence à accélérer.



FA-3 Le réservoir d'essence est vide et les batteries sont chargées. Indiquez le sens de transfert de l'énergie quand la voiture commence à accélérer.

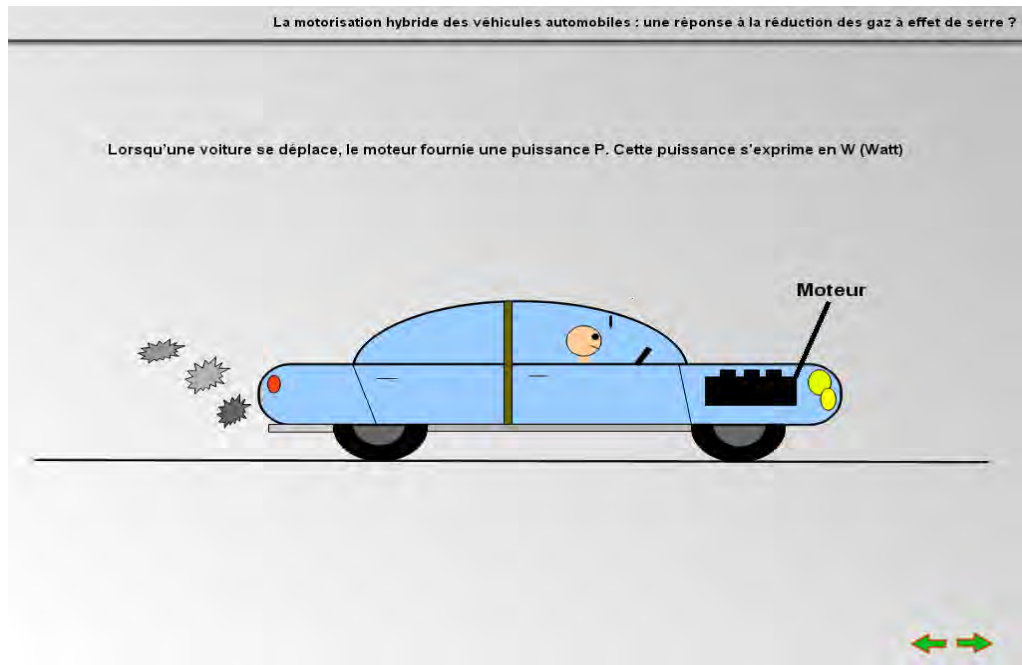


FA-4 En situation de forte accélération, la motorisation hybride est une réponse aux économies d'émissions de CO₂ car :

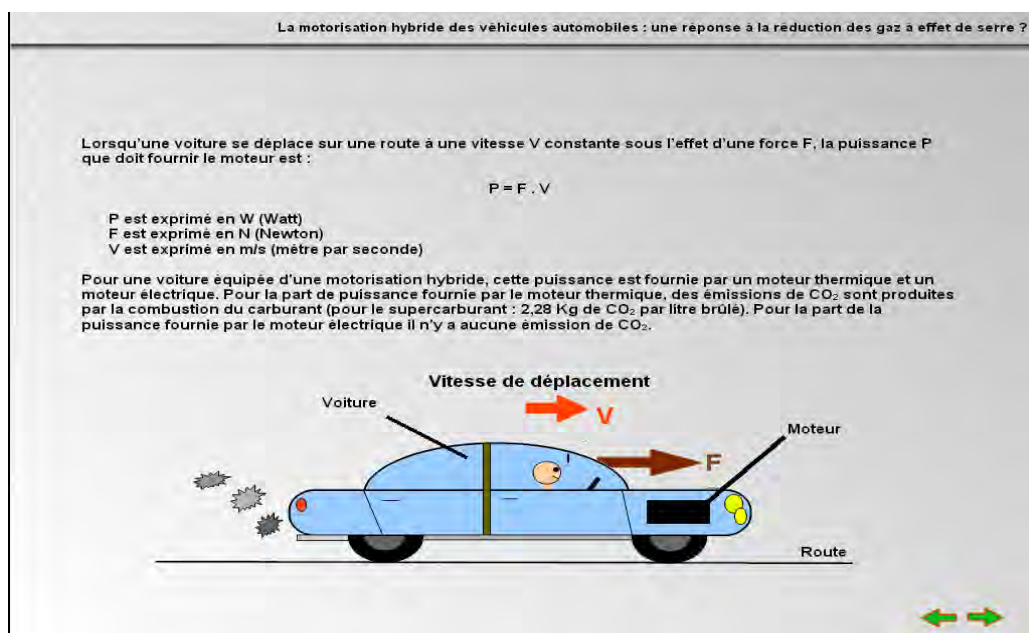
- ☐ elle permet de mieux recharger les batteries
- ☐ elle permet de sous dimensionner le moteur thermique
- ☐ elle permet d'accélérer plus progressivement
- ☐ Je ne sais pas

Exemples de planche d'étude

Un exemple pour les PARTIES : élément totalement isolé



Un exemple pour les PARTIES : élément partiellement isolé

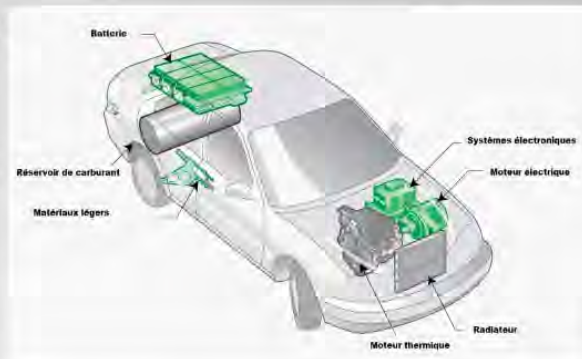


Un exemple pour le TOUT :

Quels sont les aspects fonctionnels de la motorisation hybride ? 3/3

L'assistance électrique en traction

L'assistance électrique en traction désigne l'utilisation de la machine électrique pour fournir du couple à la roue en même temps que le moteur thermique (voir figure ci-contre). Ce type de fonction offre un avantage indéniable en terme de performances car il permet de cumuler les puissances électrique et thermique pour assurer la traction du véhicule. Une utilisation intempestive de cette fonction aurait pour conséquence une décharge rapide de la batterie. Son utilisation est donc conditionnée par l'état de charge batterie. L'utilisation de l'assistance électrique pour satisfaire le besoin du conducteur en capacité d'accélération offre cependant une possibilité intéressante : celle de réduire la cylindrée du moteur thermique sans que cela ne se caractérise par une perte de performance du véhicule. Cette approche peut être comparée au downsizing par suralimentation que l'on observe sur les moteurs thermiques actuels. Selon certains équipementiers, l'assistance électrique n'est intéressante pour un véhicule particulier qu'à partir d'une certaine puissance de la machine électrique, qui s'échelonne de 5 à 10 kW selon les sources.



Annexe 4 :

Expérimentation 4

Post test

Nom :

Prénom :

Date :

Age : Ans et mois

Ce test porte sur la motorisation hybride thermique – électrique des véhicules automobiles.

Toutes les questions posées portent sur un véhicule hybride qui circule sur une route horizontale.

Une seule réponse est possible pour chaque question

Caractéristiques du véhicule hybride

Véhicule

Masse totale : $mT = 1300 \text{ kg}$

Surface de traînée équivalente : $S.C_x : 0,55$

Coefficient de frottement des pneumatiques : $K_r = 0.015$

Rendement de la transmission : 100 %

Moteur hybride

Moteur thermique

Essence, 4 cylindres, 16 soupapes, cycle ATKINSON

Puissance max : 52 kW (70 Cv)

Cylindrée : 1500 cm^3

Courbe d'iso-consommation : voir figure ci-contre

Moteur électrique

Puissance utile max : 33 kW

Batteries

Pmax durant la charge : 15 kW

Energie utilisable : 720 W

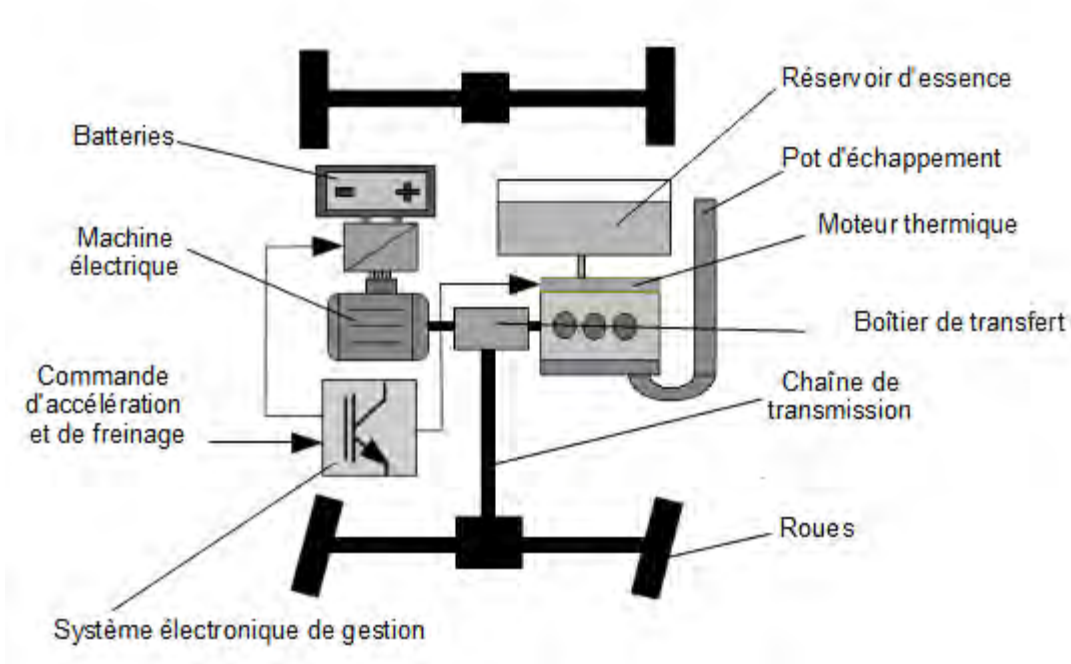
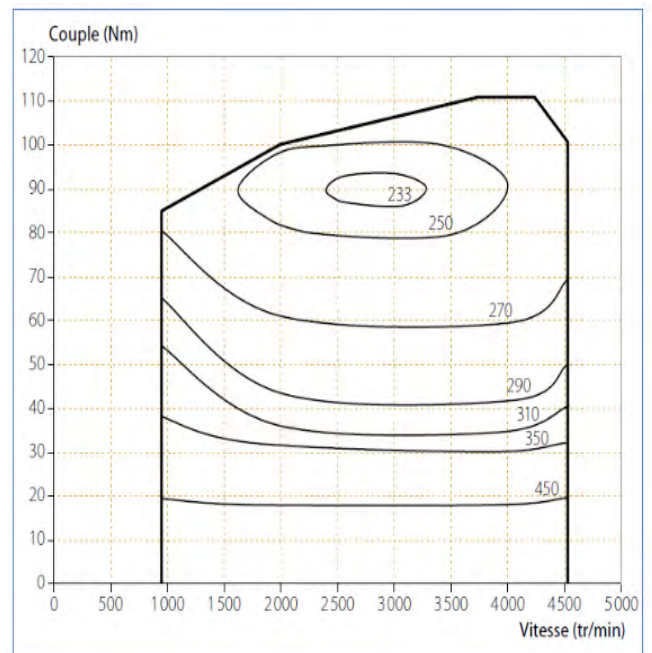
Carburant

Supercarburant

Densité : 0.72

Rejets de CO_2 : 2,28 kg par litre brûlé

Diagramme d'iso-consommation en g/kWh



Consignes

1- Pour répondre aux questions à choix multiple, indiquez votre réponse à l'aide d'une croix dans la case qui correspond à votre choix. Par exemple :

Le mois de juillet est le septième mois de l'année :

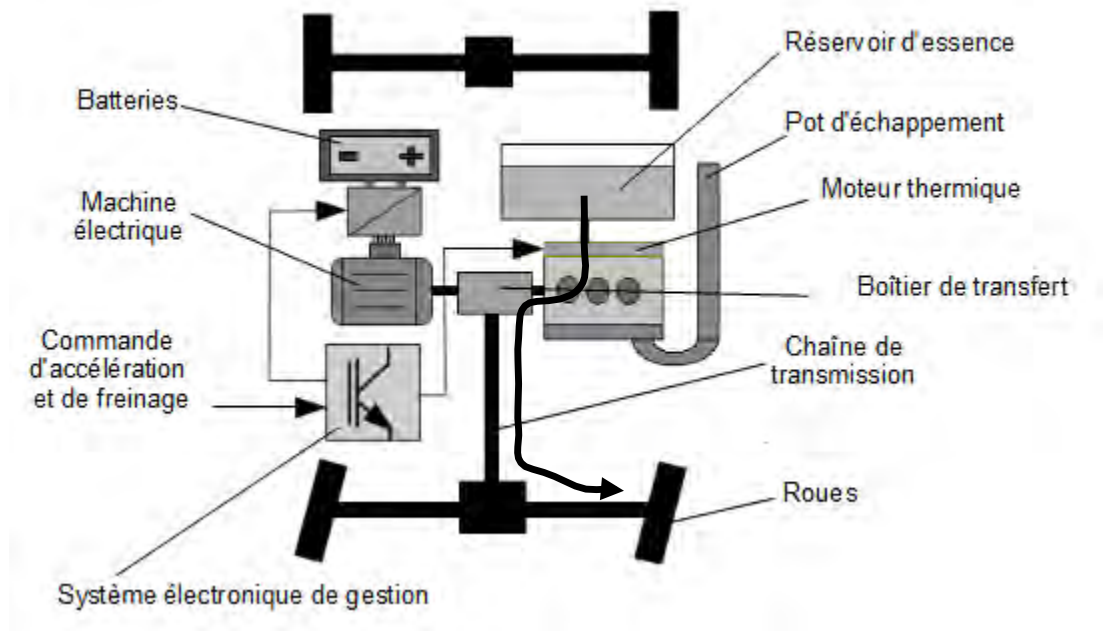
☒ C'est vrai

☐ C'est faux

☐ Je ne sais pas

2- Pour répondre aux questions sur le sens de transfert de l'énergie entre les différents composants de la motorisation hybride, dessinez à main levée un trait continu terminé par une flèche pour indiquer le sens du transfert.

Par exemple : si seul le moteur thermique entraîne les roues, nous aurons :



Questions générales

R-1 Lorsqu'une voiture se déplace dans l'air sur un support horizontal :

- ☐ Seule une force de contact s'oppose à son déplacement
- ☐ Seule une force aérodynamique s'oppose à son déplacement
- ☐ Une force aérodynamique et une force de contact s'oppose à son déplacement
- ☐ Je ne sais pas

R-2 Un effort de rotation peut s'appeler aussi :

- ☐ Un couple
- ☐ Une vitesse
- ☐ Une puissance
- ☐ Je ne sais pas

R3- Si un moteur thermique fonctionne avec de l'essence :

- ☐ Il va rejeter 2,5 kg de CO₂ par litre d'essence brûlé
- ☐ Il va rejeter 1,5 kg de CO₂ par litre d'essence brûlé
- ☐ Il va rejeter 2,28 kg de CO₂ par litre d'essence brûlé
- ☐ Je ne sais pas

R4- La consommation spécifique d'un moteur thermique s'exprime :

- ☐ En gramme par kilowatt.heure (g/kWh)
- ☐ En kilowatt.heure / gramme (kWh/g)
- ☐ Je ne sais pas

R5- Lorsqu'une voiture est en mouvement, elle possède une énergie cinétique :

- ☐ C'est vrai
- ☐ C'est faux
- ☐ Je ne sais pas

R6- Lorsqu'une voiture se déplace, le moteur :

- ☐ Consomme de la puissance
- ☐ Consomme de l'énergie
- ☐ Consomme du CO_2
- ☐ Je ne sais pas

R7- La puissance fournie par un moteur s'exprime en :

- ☐ Watt (W)
- ☐ Joule (J)
- ☐ Ampère (A)
- ☐ Je ne sais pas

R8- Les batteries sont des unités de stockage d'énergie électrique qui sont :

- ☐ Réversibles
- ☐ Irréversibles
- ☐ Je ne sais pas

R9- Quand une machine électrique fonctionne en moteur :

- ☐ La source électrique fournit de l'énergie à la machine
- ☐ La charge mécanique fournit de l'énergie à la machine
- ☐ Je ne sais pas

R10- Si la vitesse d'un solide passe de 3 m/s à 6 m/s, la force aérodynamique va tripler :

- ☐ C'est vrai
- ☐ C'est faux
- ☐ Je ne sais pas

R11- Pour un effort F constant, si la vitesse est multipliée par 2 alors la puissance est multipliée par 3:

- ☐ C'est vrai
- ☐ C'est faux
- ☐ Je ne sais pas

R12- Pour calculer un couple, il est nécessaire de connaître une force et une distance :

- ☐ C'est vrai
- ☐ C'est faux
- ☐ Je ne sais pas

R13- La puissance correspond à une énergie divisée par un temps :

- ☐ C'est vrai
- ☐ C'est faux
- ☐ Je ne sais pas

R14- La consommation d'un moteur thermique dépend de son point de fonctionnement :

- ☐ C'est vrai
- ☐ C'est faux
- ☐ Je ne sais pas

R15- Un moteur électrique permet la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique :

- ☐ C'est vrai
- ☐ C'est faux
- ☐ Je ne sais pas

R16- Si la vitesse d'un solide double, son énergie cinétique triple :

- ☐ C'est vrai
- ☐ C'est faux
- ☐ Je ne sais pas

R17- Il n'est pas nécessaire de contrôler le courant de charge d'une batterie LI-PO :

- ☐ C'est vrai
- ☐ C'est faux
- ☐ Je ne sais pas

R18- Le supercarburant est un liquide qui ne peut pas s'enflamer si on le comprime fortement :

- ☐ C'est vrai
- ☐ C'est faux
- ☐ Je ne sais pas

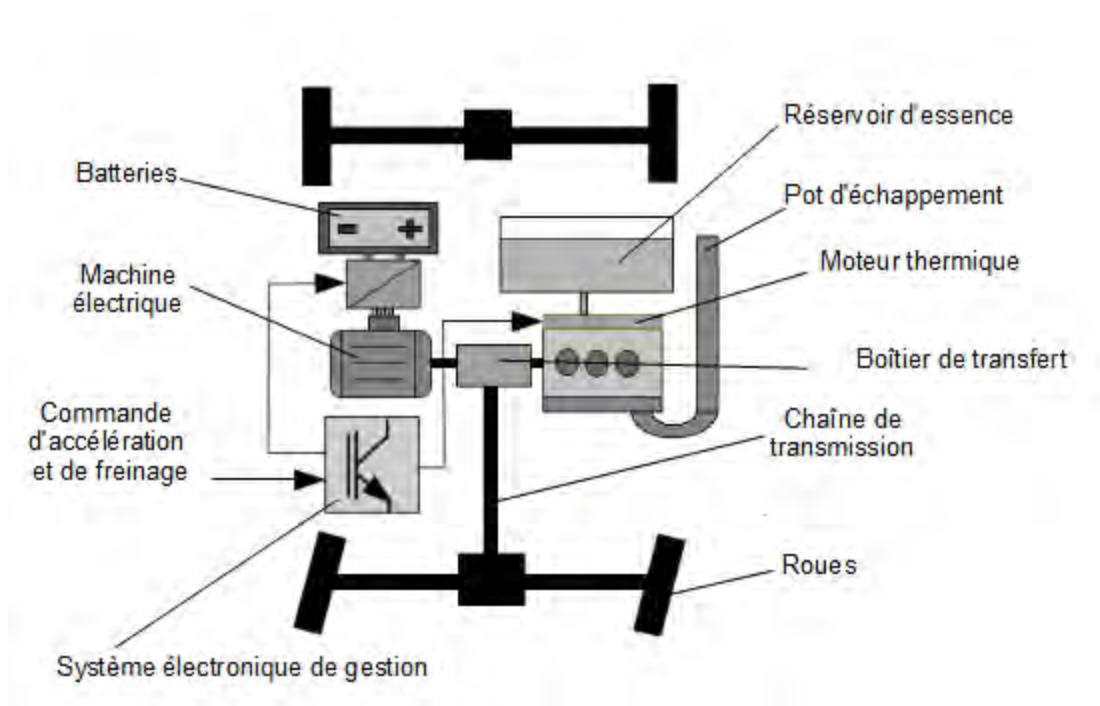
Questions sur le démarrage

Le démarrage correspond à la situation où le véhicule est à l'arrêt puis commence à rouler à faible vitesse (20 km/h).

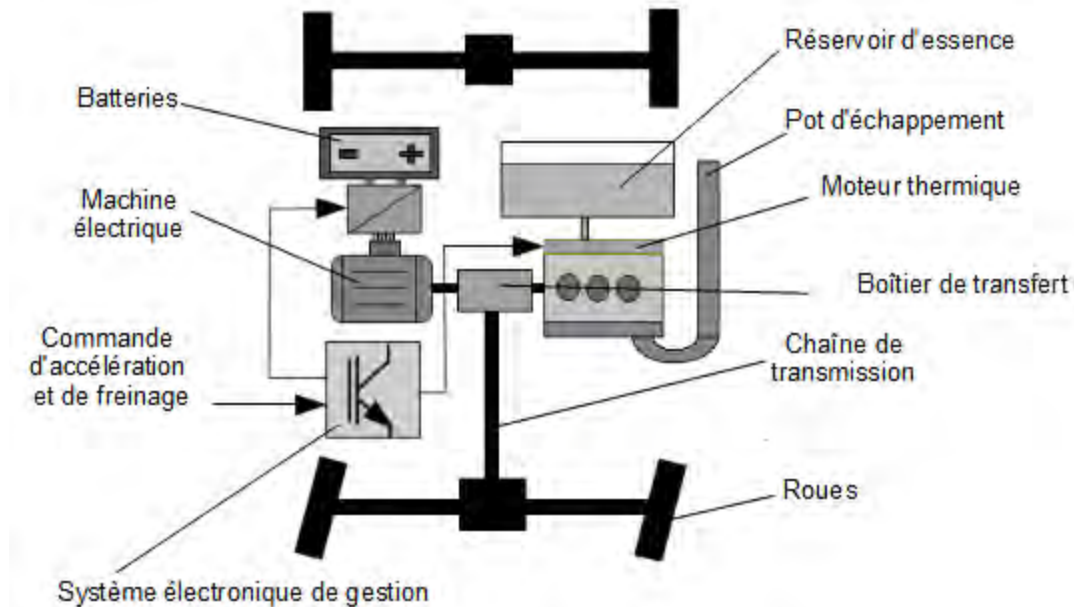
CD1- Les batteries sont déchargées et le réservoir d'essence est vide :

- ☐ Le véhicule peut démarrer
- ☐ Le véhicule ne peut pas démarrer
- ☐ Je ne sais pas

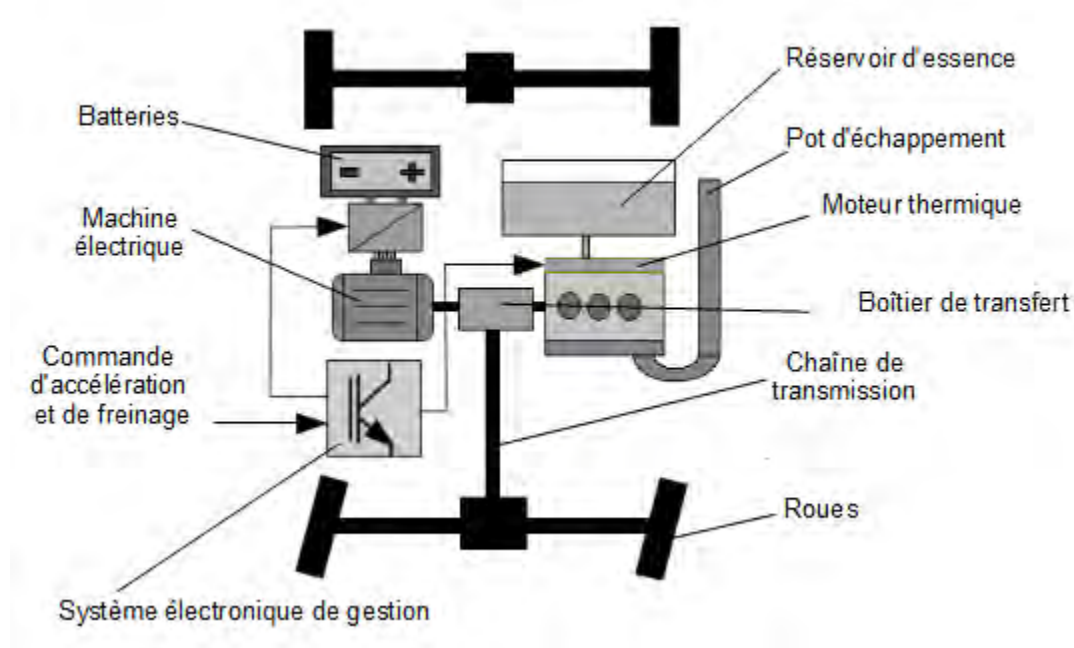
CD2- Les batteries sont déchargées et le réservoir d'essence n'est pas vide. Indiquez le sens de transfert de l'énergie quand la voiture commence à rouler.



CD3- Les batteries sont chargées et le réservoir d'essence n'est pas vide. Indiquez le sens de transfert de l'énergie quand la voiture commence à rouler.



CD4- Les batteries sont chargées et le réservoir d'essence est vide. Indiquez le sens de transfert de l'énergie quand la voiture commence à rouler.



Questions sur le régime de vitesse intermédiaire

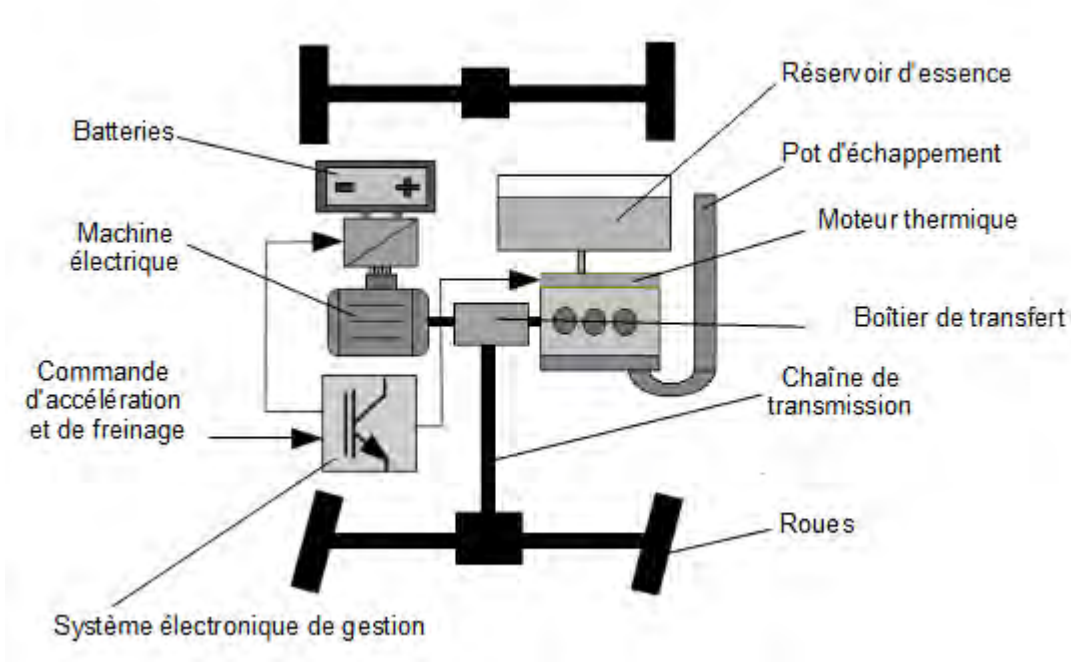
Le régime de vitesse intermédiaire correspond à la situation où le véhicule roule à une vitesse moyenne (80 km/h).

CVI1- Quand le réservoir ne contient plus d'essence :

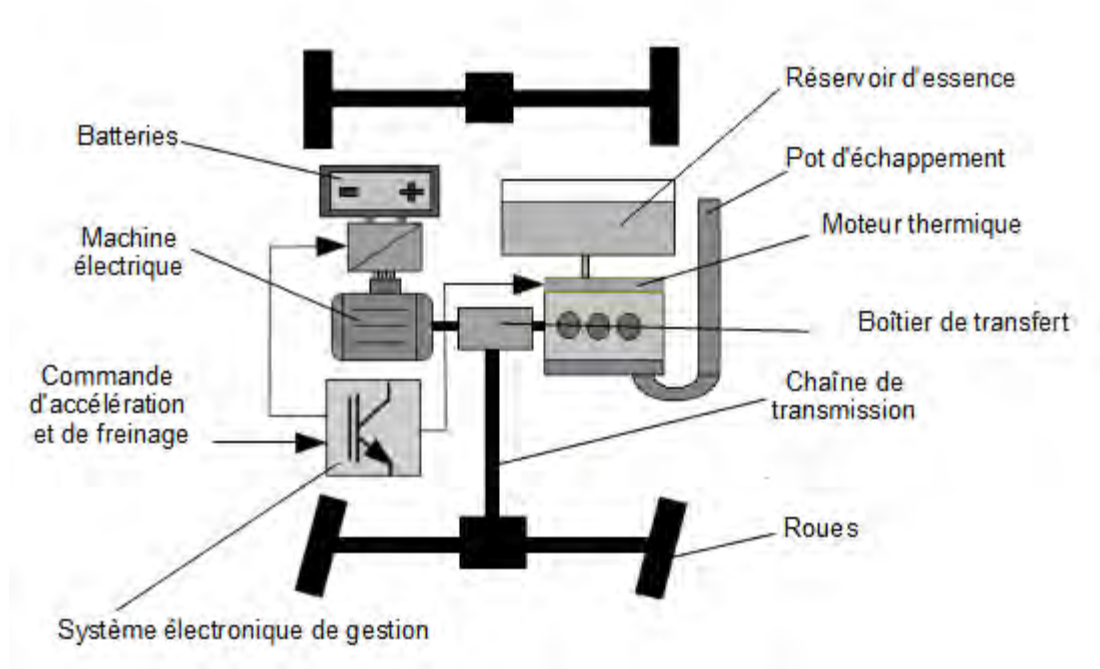
- ☐ Le moteur électrique peut assurer l'entraînement du véhicule de façon permanente
- ☐ La machine électrique entraîne le moteur thermique de façon intermittente
- ☐ Le véhicule possède une autonomie très réduite
- ☐ Je ne sais pas

CVI2- Le véhicule roule à vitesse intermédiaire (80 km/h). Indiquez, pour chaque phase, le sens de transfert de l'énergie

Phase 1 : le réservoir d'essence n'est pas vide et les batteries sont chargées



Phase 2 : le réservoir d'essence n'est pas vide et les batteries sont déchargées



CVI3- Le véhicule roule à 80 km/h, les batteries sont chargées et le réservoir d'essence vient juste de se vider :

- ☐ Le véhicule s'arrête immédiatement
- ☐ Le véhicule continue de rouler
- ☐ Je ne sais pas

CVI4- Le véhicule roule à 80 km/h, les batteries sont déchargées et le réservoir d'essence est vide :

- ☐ Le véhicule s'arrête immédiatement
- ☐ Le véhicule continue de rouler jusqu'à ce que les batteries soient de nouveau chargées
- ☐ Je ne sais pas

CVI5- Lorsque le moteur thermique fonctionne à son meilleur rendement, il fournit une puissance égale à 22700 W. Pour entraîner le véhicule à une vitesse de 80 km/h, il faut une puissance égale à 7700 W. La différence de puissance, soit 15 kW, va permettre :

- ☐ de décharger les batteries
- ☐ de recharger les batteries
- ☐ de remplir le réservoir d'essence
- ☐ Je ne sais pas

CVI6- En situation de vitesse intermédiaire, la motorisation hybride est une réponse aux économies d'émissions de CO₂ car :

- ☐ elle permet de toujours faire fonctionner le moteur thermique à son meilleur rendement
- ☐ elle permet de ne jamais faire fonctionner le moteur thermique
- ☐ elle permet de ne jamais faire fonctionner la machine électrique
- ☐ Je ne sais pas

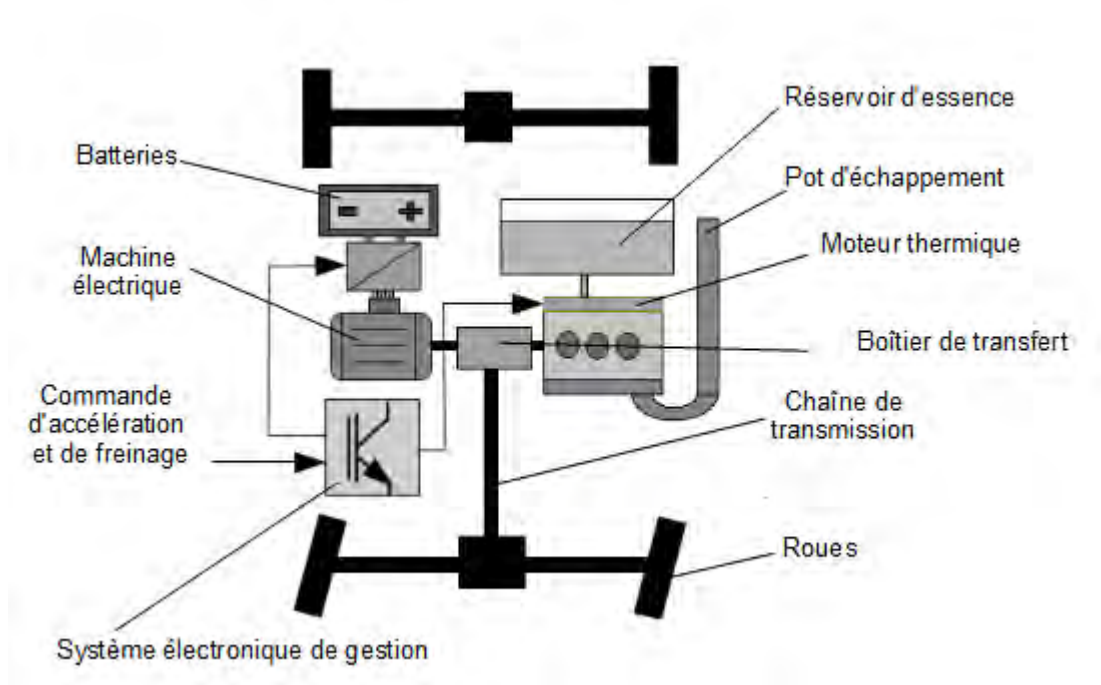
Questions sur le régime de freinage non urgent

Le régime de freinage non urgent correspond à la situation où le véhicule roule à une vitesse moyenne (par exemple 50 km/h) et ralentie pour s'arrêter à un stop.

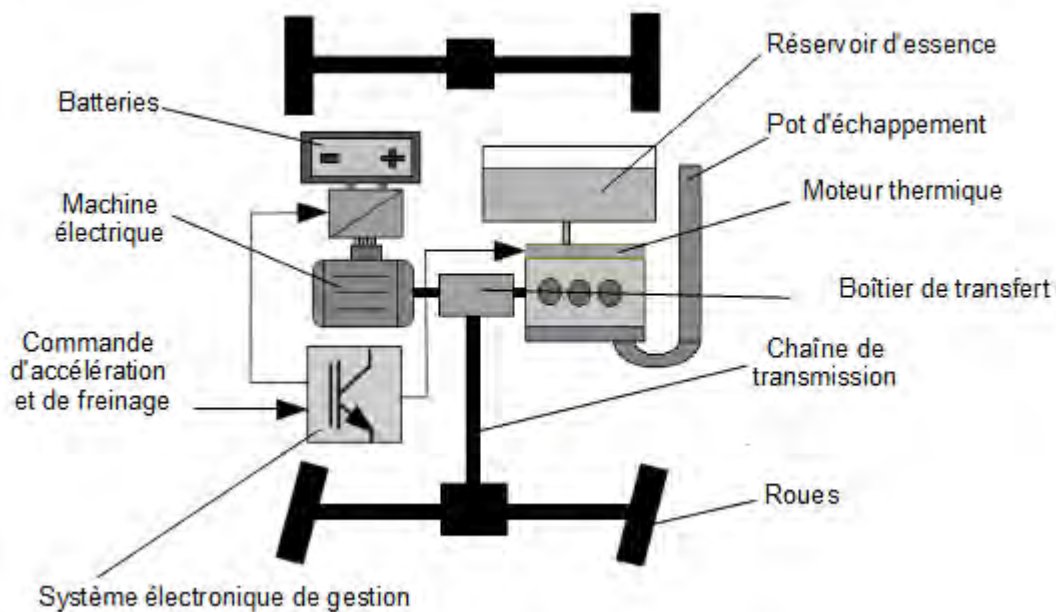
CFR1- le réservoir d'essence est vide :

- ☐ Le véhicule peut freiner à l'aide du moteur thermique
- ☐ Le véhicule ne peut pas freiner à l'aide du moteur thermique
- ☐ Je ne sais pas

CFR2- Les batteries sont déchargées. Indiquez le sens de transfert de l'énergie quand la voiture commence à freiner.



CFR3- Les batteries sont chargées. Indiquez le sens de transfert de l'énergie quand la voiture comm



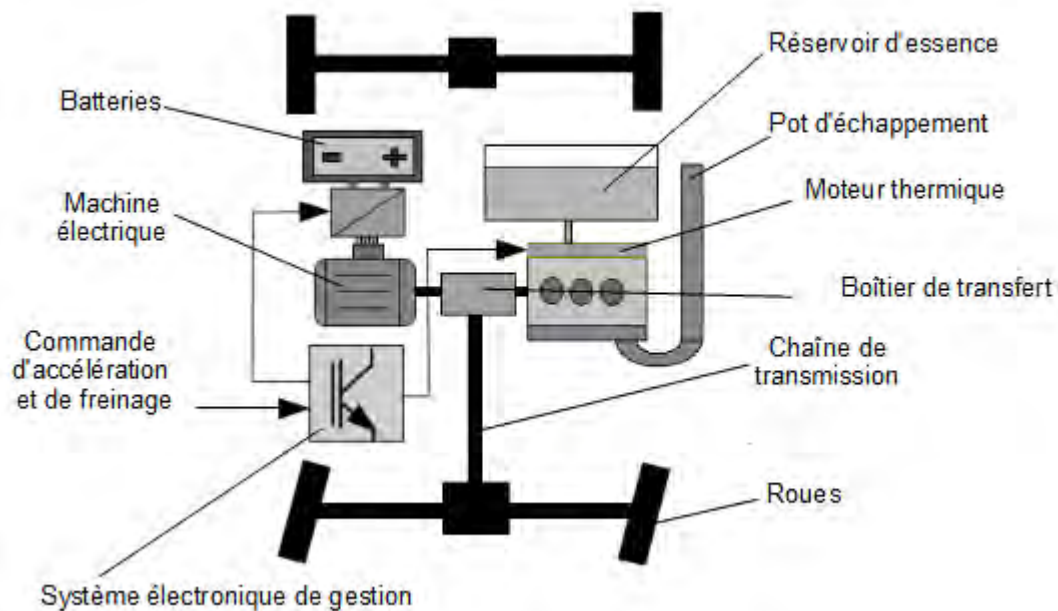
CFR4- En situation de freinage non urgent, la motorisation hybride est une réponse aux économies d'émissions de CO₂ car :

- ☐ elle permet d'utiliser plus souvent le frein moteur
- ☐ elle permet de récupérer l'énergie cinétique du véhicule sous forme électrique
- ☐ elle permet de diminuer la quantité d'essence utilisée lors des freinages
- ☐ je ne sais pas

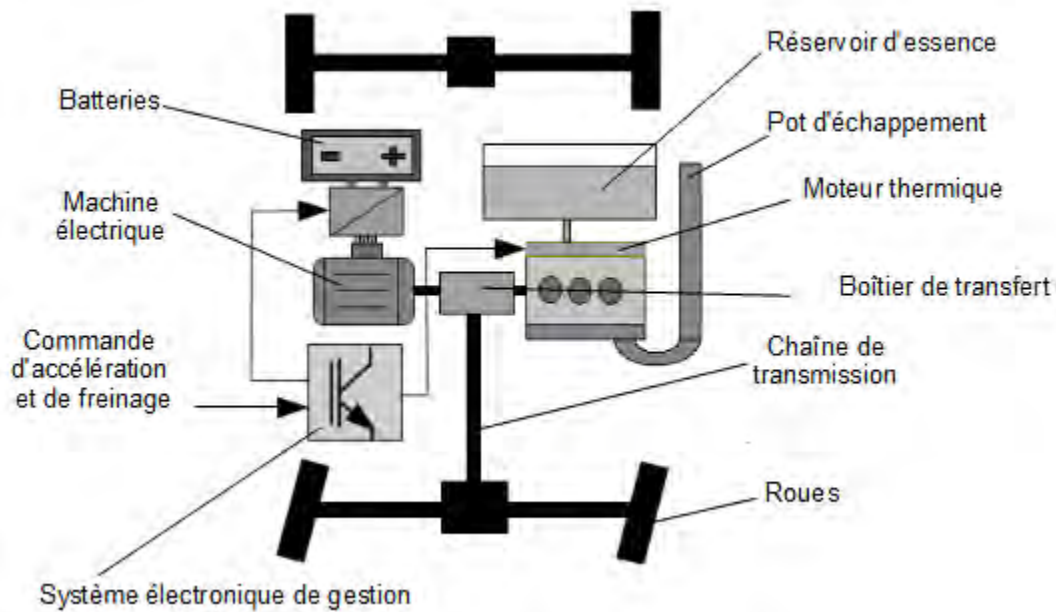
Questions sur le régime de fortes accélérations

Le régime de fortes accélérations correspond à la situation où le véhicule roule à une vitesse moyenne (80 km/h) et augmente rapidement sa vitesse pour doubler un autre véhicule par exemple.

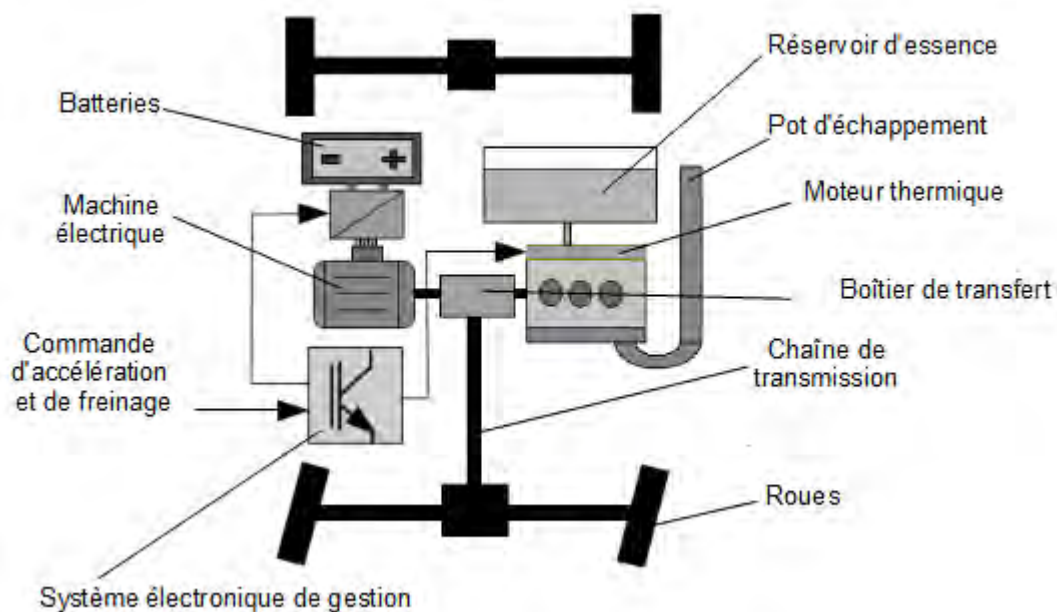
CFA-1 Le réservoir d'essence n'est pas vide et les batteries sont déchargées. Indiquez le sens de transfert de l'énergie quand la voiture commence à accélérer.



CFA-2 Le réservoir d'essence n'est pas vide et les batteries sont chargées. Indiquez le sens de transfert de l'énergie quand la voiture commence à accélérer.



CFA-3 Le réservoir d'essence est vide et les batteries sont chargées. Indiquez le sens de transfert de l'énergie quand la voiture commence à accélérer.



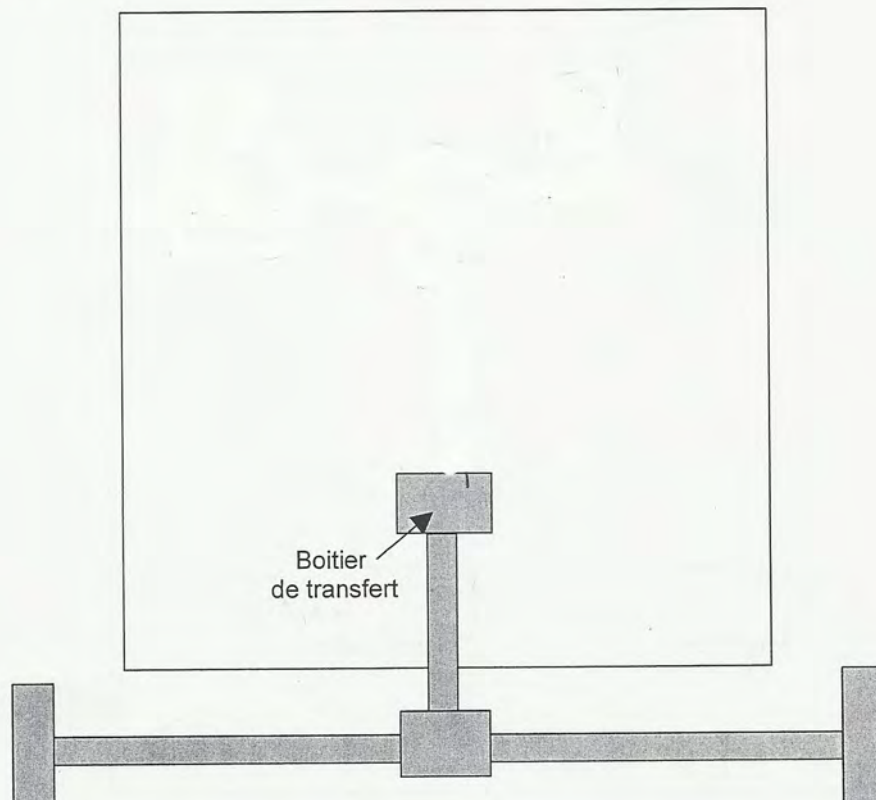
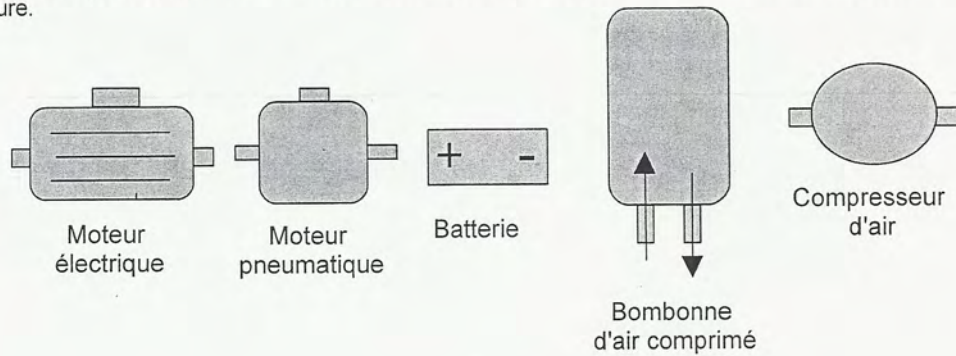
CFA-4 En situation de forte accélération, la motorisation hybride est une réponse aux économies d'émissions de CO₂ car :

- ☐ elle permet de mieux recharger les batteries
- ☐ elle permet de sous dimensionner le moteur thermique
- ☐ elle permet d'accélérer plus progressivement
- ☐ Je ne sais pas

Les autres types d'hybridations pour limiter les émissions de CO₂

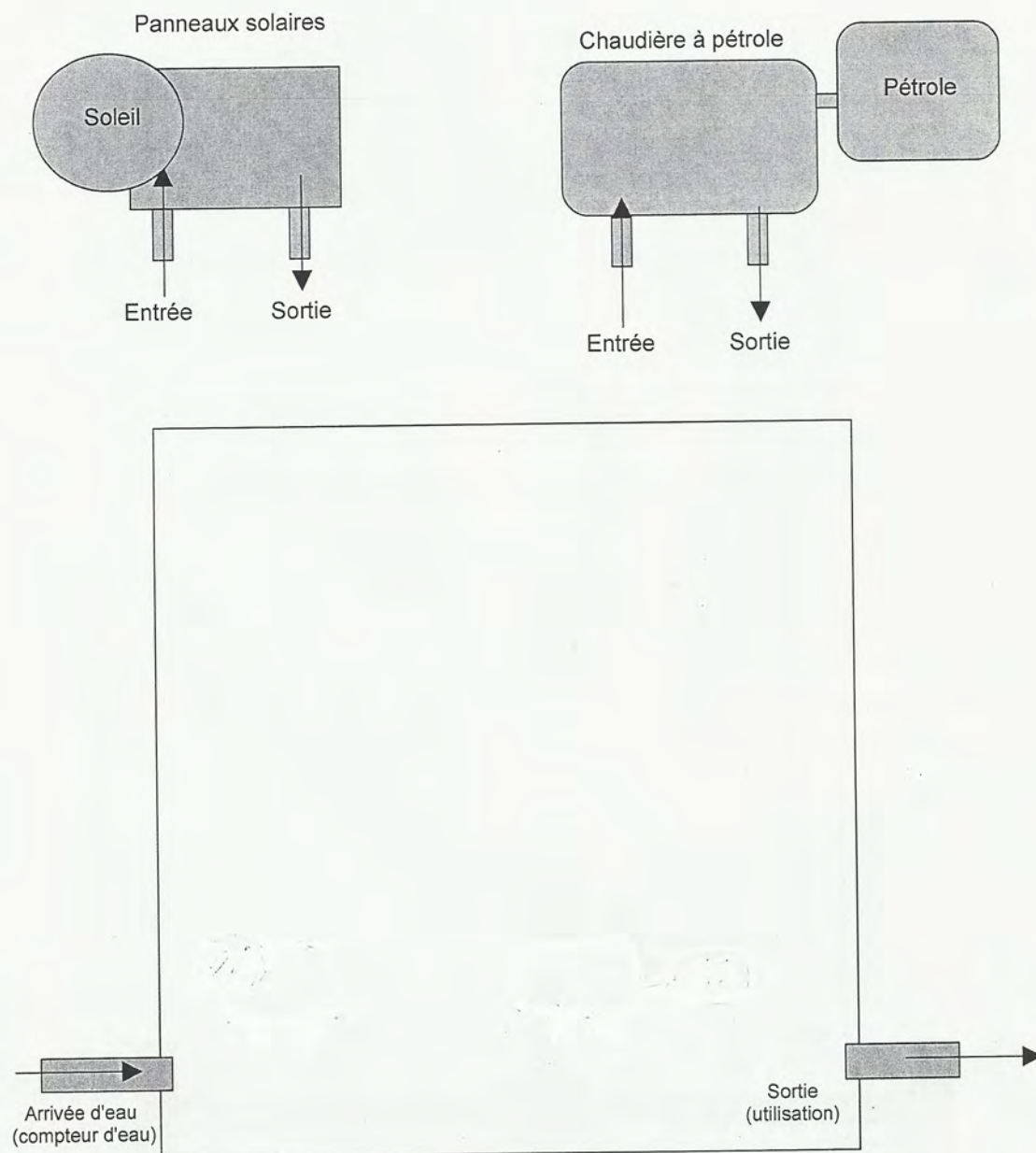
T1 : Hybridation électro - pneumatique

Placer les composants donnés ci-dessous dans le rectangle en trait fin. Relier ces différents composants pour former un moteur hybride électro-pneumatique afin d'entraîner les roues d'une voiture.



T2 : Hybridation solaire-gaz pour faire de l'eau chaude

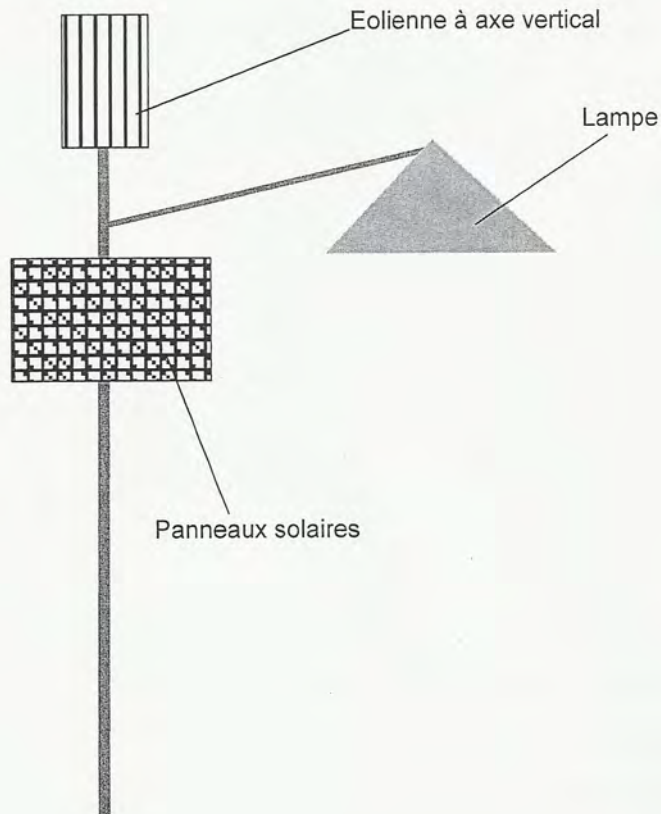
Placer les composants donnés ci-dessous dans le rectangle en trait fin. Relier ces différents composants pour réaliser un dispositif de chauffage d'eau qui minimise les émissions de CO₂ en assurant la disponibilité de l'eau chaude quelle que soit la saison.



T3 : Les lampadaires hybrides V-light (IMEX Innovations et énergies)

Les lampadaires IMEX LAMP permettent de réaliser un éclairage nocturne sans consommer d'énergie externe et sans émettre de gaz à effet de serre.

Les lampadaires hybrides fonctionnent grâce à des cellules photoélectriques ainsi qu'à une petite éolienne intégrée dans le design du lampadaire. Les cellules photovoltaïques permettent de récupérer l'énergie du soleil et l'éolienne à axe vertical, permet de capter les vents dans toutes les directions.



Pour fonctionner nuit et jour avec ou sans vent, indiquer quel composant indispensable est absent dans ce schéma :

Réponse : il manque

T-4 : Le chauffage dans les grands magasins

L'hiver, dans les grands magasins, le chauffage est assuré par une chaudière à gaz, électrique ou à fuel.

Sachant qu'une personne produit un rayonnement thermique de 70 W (environ), pour diminuer la consommation d'énergie de la chaudière en gardant une température constante, il faut :

- ☐ compter les personnes qui rentrent dans le grand magasin
- ☐ compter les personnes qui sortent du grand magasin
- ☐ faire la différence entre les personnes qui rentrent et les personnes qui sortent du grand magasin
- ☒ Je ne sais pas

T5 : Les trottoirs intelligents de TOULOUSE

Un trottoir qui produit de l'électricité a été expérimenté à Toulouse...

Courant avril 2010, la ville de Toulouse a expérimenté un trottoir qui produit de l'électricité. Pour l'instant, ce sont seulement quelques dalles qui ont été installées en centre-ville mais ce système unique au monde permet d'entrevoir toute une série d'applications pour la ville.

Equipées de micro-capteurs et reliées à une batterie qui stocke l'énergie libérée par les passants, les dalles produisent environ 30 W.h, juste de quoi faire fonctionner les réverbères qui les surplombent.

L'énergie libérée par les passants, c'est :

- ☐ de l'énergie mécanique
- ☒ de l'énergie chimique
- ☐ de l'énergie magnétique
- ☐ Je ne sais pas

Annexe 5 : Petit guide de présentation de la démarche
expérimentale en psychologie à l'intention des
enseignants de l'Education nationale

Introduction

La présentation qui va suivre a pour objectif de donner aux enseignants de l'Education nationale, et plus généralement à toute personne qui souhaite comprendre comment les chercheurs en psychologie mènent leurs expérimentations, une description des différentes étapes qui conduisent à présenter des résultats expérimentaux à partir d'échantillons de population et à se prononcer sur le fait que ces résultats peuvent être valables pour toute la population.

1- La démarche générale

Sur un sujet de recherche donné (dans cette thèse, les environnements d'apprentissage fondés sur des séquencements en deux étapes), le chercheur en psychologie doit dans un premier temps faire une revue de la littérature scientifique la plus exhaustive possible pour s'assurer que les travaux qu'il va mener n'ont pas été déjà réalisés. Quelques fois, des travaux ont été réalisés mais ils peuvent être répliqués, enrichis par des contextes différents, des populations différentes (par exemple passer d'une population d'enfants à une population d'adultes). Dans un deuxième temps, le chercheur pose des hypothèses (la présentation qui va du simple vers le complexe donne de meilleures performances d'apprentissage que la présentation qui va du complexe vers le simple) puis il va mettre en place une expérimentation pour tenter de les valider.

2- La mise en place d'une expérimentation

Pour réaliser une expérimentation, le chercheur en psychologie commence par définir les objectifs de son expérimentation (qu'est ce qu'on veut tester ? Ici, les effets d'un séquencement des apprentissages en deux étapes) et des hypothèses générales (la modalité du simple vers le complexe est meilleure que la modalité du complexe vers le simple). Ensuite il conçoit, crée puis aménage un dispositif expérimental pour recueillir des données. L'ensemble de la démarche repose sur le choix des participants, sur la conception et la création du matériel expérimental (ici le développement de séquences multimédia et leur implantation dans une salle informatique) et sur la définition de la procédure expérimentale. A l'issue de l'expérimentation, les données sont traitées.

2-1 Le choix des participants

Pour tester des modalités d'apprentissage que l'on souhaite préconiser dans le contexte scolaire, il est très opportun de recruter des participants parmi des élèves scolarisés. Il faut auparavant s'assurer que les participants n'aient pas reçu de formation dans le domaine qu'ils vont étudier au cours de la passation de l'expérience. Ils doivent donner leur consentement, ils ne sont pas obligés de participer et, pour ceux qui participent, les résultats obtenus sont confidentiels et ne rentrent pas dans le calcul des résultats présentés dans le bulletin scolaire.

2-2 Le matériel expérimental

Le matériel expérimental est constitué de plusieurs dispositifs matériels d'apprentissage caractéristiques des différentes modalités de présentation que l'on souhaite tester. Par exemple, un dispositif sera développé pour présenter un séquençement qui va du simple vers le complexe, un autre sera développé pour présenter les informations avec un séquençement qui va du complexe vers le simple. Dans tous les cas, la quantité d'information présentée aux apprenants doit rester la même de manière à n'évaluer que l'effet du sens de présentation.

2-3 La procédure expérimentale

La procédure expérimentale doit être soigneusement préparée car elle doit permettre de placer les apprenants dans des conditions équivalentes. Les consignes sont données de la même manière à tous les groupes, les apprenants sont répartis de façon aléatoire dans chaque modalité d'apprentissage par tirage au sort. Lorsque les apprenants ont terminé leur phase d'apprentissage, ils lèvent la main et restent dans la salle pour attendre la suite de l'expérience.

3- Le recueil des résultats et leur traitement

Une semaine avant la passation, les apprenants répondent à un prétest pour évaluer l'état de leurs connaissances préalables dans le domaine étudié. A la suite de la passation (qui va leur permettre d'apprendre des connaissances dans le domaine soumis à l'étude), les apprenants répondent à un post-test immédiat puis dans certains cas, ils répondent à un post-test différé (en général, un mois plus tard) pour évaluer leurs connaissances restantes. Les données recueillies sont de plusieurs natures. Elles sont issues de questions de rappel, de compréhension et de transfert. Les questions de rappel permettent de mesurer ce que les apprenants ont retenu de ce qui était explicitement présenté dans le matériel d'apprentissage.

Les questions de compréhension permettent de mesurer ce que les apprenants ont été capables de mobiliser comme connaissances pour résoudre des problèmes dans le contexte de l'étude. Les questions de transfert permettent de mesurer si les apprenants sont capables de mobiliser les connaissances qu'ils ont apprises dans la résolution de problème dans des contextes différents de celui du domaine qu'ils ont étudié durant l'expérimentation. D'autres données sont recueillies à l'aide d'échelles autorapportées. Ces échelles sont basées sur l'évaluation personnelle d'un degré d'adhésion à une proposition avec une échelle de Lickert en 5 ou 9 points. Ces mesures sont par exemple utilisées pour évaluer l'effort mental investi lors d'un apprentissage.

3-1 Le traitement statistique sur les échantillons (les statistiques descriptives)

Dans une première étape, l'expérimentateur analyse les données issues des différents groupes expérimentaux pour établir des traitements qui donneront une description statistique des distributions obtenues (moyenne, écart-type, variance, homogénéité).

3-2 Les traitements statistiques pour généraliser les résultats (les statistiques inférentielles)

Les résultats obtenus lors de l'expérimentation sont des résultats qui ne sont valables que pour l'échantillon des apprenants qui a participé à l'expérimentation. L'intérêt est de voir s'ils sont généralisables à toute la population d'apprenants de même caractéristiques. Pour cela, des traitements complémentaires sont nécessaires. Ces traitements sont fondés sur des analyses issues des méthodes statistiques inférentielles, ils permettent de valider (ou d'invalidier) la généralisation des résultats obtenus à partir des différents groupes expérimentaux. Ces tests (par exemple « t de STUDENT », ANOVA) sont réalisés à l'aide de logiciels spécialisés.

4- Conclusion

Les expérimentations sont réalisées dans des conditions particulières et elles doivent être répliquées plusieurs fois pour s'assurer de la stabilité des résultats obtenus en variant les contextes d'étude, l'âge des participants, l'état des connaissances préalables et d'autres paramètres si nécessaire. En ce sens, les recherches ne permettent pas de donner des propriétés définitives mais elles contribuent à identifier les caractéristiques des situations d'apprentissage afin de les rationaliser, de les modéliser, de les rendre transférables et communicables. Cette démarche relève de l'ingénierie au service de la conception des environnements d'apprentissage.